

Исследование дополнительных потерь оптической мощности, возникающих при механическом изгибе оптического волокна стандарта G.652

¹**МЕХТИЕВ Али Джаванширович**, к.т.н., профессор, barton.kz@mail.ru,
²**АЛЬКИНА Алия Даулетхановна**, старший преподаватель, alika_1308@mail.ru,
²**НЕШИНА Елена Геннадьевна**, к.т.н., зав. кафедрой, 1_neg@mail.ru,
^{2*}**КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич**, PhD, зав. кафедрой, 90nurbol@mail.ru,
¹**МУСАГАЖИНОВ Мадияр Жалелович**, докторант, musagazhinov@bk.ru,
¹НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», пр. Женис, 62, Астана, Казахстан,
²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,
*автор-корреспондент.

Аннотация. Статья посвящена вопросам создания альтернативы волоконно-оптическим линиям передачи информации. Рассмотрена одна из проблем работы систем телекоммуникации Республики Казахстан – затухание сигналов в системах передачи данных ФТТ. Описана главная идея использования оптического волокна стандарта G.652-656, которое достаточно чувствительно к изгибам. На местных предприятиях освоен выпуск волоконно-оптических кабелей и патч-кордов на основе стандарта G.652. Изгиб вызывает потерю мощности световой волны, изменяет фазу распространения моды и приводит к затуханию сигнала, при котором абоненты не могут нормально работать в сети интернета. В данной статье имитировались различные виды микроизгибов. Микроизгибы оптического волокна с малым радиусом приводят к его повреждению. Такая ситуация возникает при нарушении технологии монтажа волоконно-оптического кабеля. В работе проведены исследования, направленные на получение новых научных результатов, связанных с построением характеристик дополнительных потерь, возникающих при изгибе ОВ в зависимости от количества углов, их градуса и длины волны оптического излучения. Приведены выводы о дальнейшем использовании для разработки датчиков, основанных на контроле дополнительных потерь при микроизгибе, а также создания систем защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям. Исследования направлены на разработку программного обеспечения для численного расчета дополнительных потерь с оценкой точности построения аппроксимации по заданным параметрам: количеству изгибов, углу и длине волны оптического излучения, распространяющегося по сердцевине ОВ.

Ключевые слова: оптическое волокно, затухание сигналов, микроизгиб, фотоупругий эффект, световая волна, фаза распространения моды, радиус, методы и средства защиты, дополнительные потери.

Введение

Развитие волоконно-оптической техники и технологии послужило толчком для разработки волоконно-оптических датчиков (ВОД), которые уже используются в различных областях промышленности [1]. Оптическое волокно (ОВ) предназначено для передачи информации в системах телекоммуникации. Имеются сведения по разработ-

ке и использованию ВОД в различных областях промышленности [2], предлагаются различные конструкции датчиков. ОВ позволяет одновременно передавать оптические сигналы различной длины волны при помощи методов мультиплексирования, это обеспечивает использование ОВ одновременно как направляющую систему, так и как датчик [3]. В статье [4] представлены

сведения о преимуществах ВОД в сравнении с электрическими датчиками. ВОД способны достаточно эффективно работать длительное время в экстремальных условиях. Имеются сведения о существовании ВОД, предназначенных для измерения механических напряжений и давления горных пород [5, 6]. Существуют различные типы ОВ, которые используются для измерения различных физических величин [7]. В данной статье будет рассмотрен только один тип ОВ, который массово применяется в телекоммуникационных системах, – это одномодовое ОВ стандарта G 652. Данный тип ОВ используется в некоторых известных конструкциях ВОД и позволяет измерять механические нагрузки и напряжения [8]. В статьях [9, 10] можно найти сведения об исследованиях ОВ стандарта G 652 и датчиков, созданных на его основе. Это по своей сути амплитудные ВОД, имеющие достаточно высокий показатель линейности характеристик и простоту конструкции, что делает их весьма перспективными для внедрения. Также в данных статьях можно найти сведения по исследованию дополнительных потерь оптической мощности при механическом воздействии на боковую грань ОВ [11]. Используемое в исследованиях ОВ стандарта G 652 выполнено из кварцевого стекла, но имеются другие типы волокон, которые используются для различных ВОД, выполненные из пластика [12], по мнению авторов, за такими ОВ большое будущее, но данные ОВ не планируется использовать, так как в качестве ВОД используются резервные волокна. Микроизгиб ОВ и возникающий при этом фотоупругий эффект достаточно подробно рассмотрены в работах [13, 14], из данных публикаций можно получить информацию о самом процессе микроизгиба ОВ и уровне дополнительных потерь оптической мощности, возникающих при различных условиях механического воздействия на ОВ. Существуют ВОД, основанные на контроле дополнительных потерь, которые позволяют контролировать уровень механического воздействия или нагрузки на ОВ [15].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований дополнительных потерь оптической мощности, возникающих при механическом изгибе одномодового оптического волокна стандарта G.652 (ОВ), был выбран эмпирический метод, основанный на проведении натурных опытов и получении экспериментальных данных. Для проведения натурных опытов был использован специально разработанный лабораторный стенд. Полученные данные были внесены в программу Microsoft

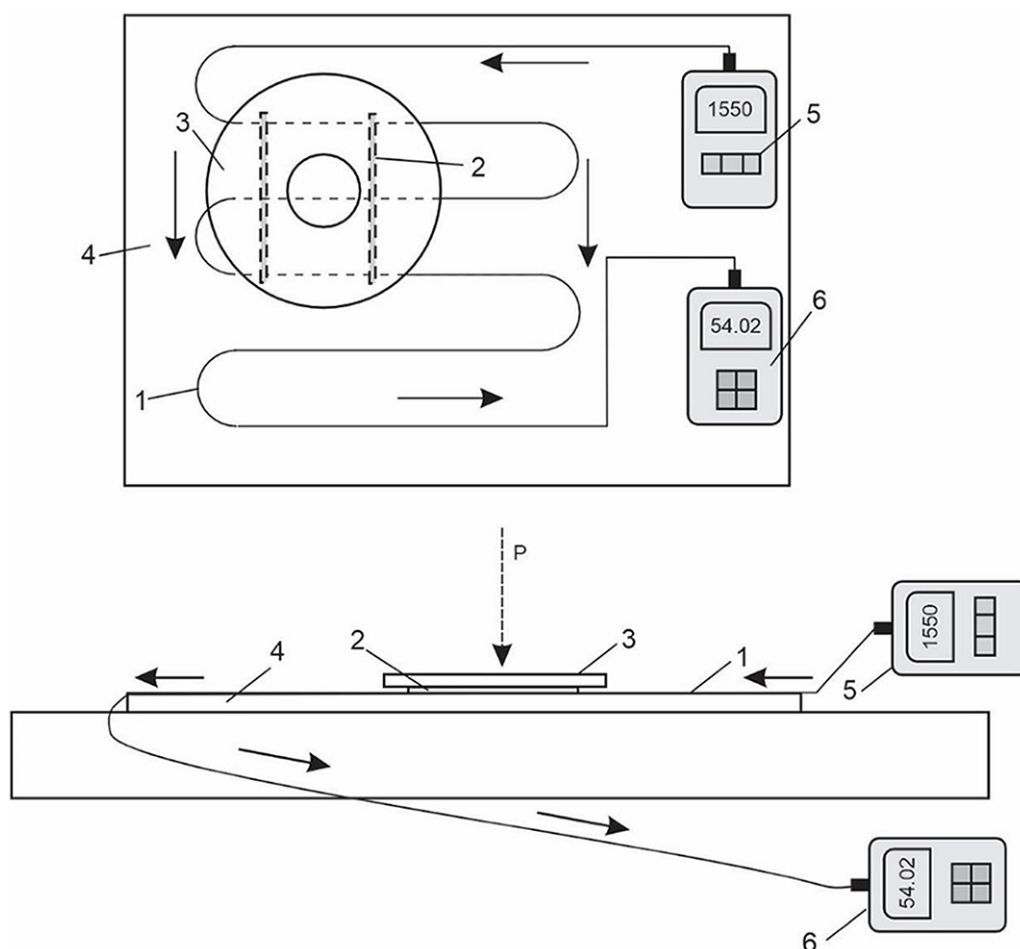
Excel для построения автоматической аппроксимации графика потерь оптической мощности при различном уровне механического воздействия на ОВ и длине волны оптического излучения. Разработанный стенд имеет в своей основе мягкую пластиковую подложку, на которую было приклеен отрезок ОВ стандарта G.652, отрезок укладывался змейкой и фиксировался в нескольких точках при помощи термоклей. Были учтены факторы, влияющие на увеличение дополнительных потерь при изгибе ОВ, для их снижения изгибы выполнены со значительным превышением допустимого радиуса изгиба. Критическим радиусом является, когда радиус изгиба менее 20 радиусов ОВ, это может вызвать образование трещин, которые могут стать причиной его разрушения. Радиус изгиба составлял около 50 мм, что не критично для диаметра ОВ, равного 125 мкм. При этом проводилось экспресс-тестирование сформированных изгибов при помощи ручного дефектоскопа с длиной волны 650 нм, с помощью которого можно выявить видимые дефекты ОВ или случаи чрезмерного изгиба ОВ и выхода излучения за пределы оболочки. Также был учтен фактор, что на процесс разрушения ОВ влияет температура окружающей среды, это касается, в особенности если она является отрицательной и ОВ становится более хрупким. При проведении экспериментов температура в помещении не изменялась в широких пределах и оставалась стабильной в пределах 22-23°C. Перед проведением экспериментов были выполнены измерения потерь оптической мощности в отрезке ОВ, закрепленного на пластиковом основании, результаты были зафиксированы как начальные условия эксперимента. ОВ присоединялось к измерительным приборам при помощи оптических коннекторов, которые обеспечивают разъёмные присоединения. Использованы оптические коннекторы типа SC и FC с полировкой UTP и ферулой 2,5 мм. ОВ являлось датчиком механической нагрузки, по уровню роста дополнительных потерь и приложенному весу была выполнена его калибровка. Физический принцип работы лабораторного образца волоконно-оптического датчика веса в своей основе имеет метод контроля изменения амплитуды дополнительных потерь, возникающих в ОВ при его микроизгибе. Соответственно данный волоконно-оптический датчик нагрузки можно отнести к амплитудным. Объектом исследования был отрезок одномодового ОВ стандарта G652 с диаметром 125/9 мкм (производитель Corning, США) и имел внешнее защитное покрытие из акрилового лака. Диаметр ОВ с защитной оболочкой составил около 250 мкм. Исследование проводилось с

использованием метода измерения дополнительных потерь при формировании изгиба, эффекта светопропускания. При изгибе ОВ возникает также фотоупругий эффект, который вызывает изменения параметров преломления и фазы распространения оптической волны по сердцевине ОВ. При изгибе, а в данном случае микроизгибе, наблюдается выход части оптического излучения из сердцевины в оболочку, далее в окружающее пространство. Это явление называется потерями оптической мощности при микроизгибе. При проведении экспериментов микроизгиб создавался при помощи двух металлических стержней, которые непосредственно давили на боковую грань волокна. Источник механической нагрузки имеет форму диска, на который устанавливались контрольные гири различного веса, вес изменялся от 0 до 10 кг с шагом в 1 кг.

В качестве измерительных приборов использован источник оптического излучения VIAVI (JDSU) SmartPocket OLS (производства США) с длиной волны от 780 до 1650

нм. Для измерителя оптической мощности был использован оптический ваттметр VIAVI (JDSU) SmartPocket OLP-38 (производства США) с абсолютной погрешностью $\pm 5\%$. Данный прибор способен работать с длиной оптической волны 1300-1625 нм.

Упрощенная схема лабораторного стенда, использованного в экспериментах, представлена на рисунке 1. В качестве чувствительного элемента использовано ОВ 1, по которому пропусклась оптическая волна длиной 1310 и 1550 нм, направление движения оптического излучения от источника к фотоприемнику показано сплошной стрелкой. Нагрузка на ОВ создавалась при помощи двух стальных стержней 2, их диаметр составлял 1 мм. Стержни 2 непосредственно давили на боковую грань волокна, передавая вес нагрузки, которая размещалась на поверхности стального диска 3. ОВ было закреплено на пластиковом основании 4, которое размещалось на поверхности стола. Направление приложения нагрузки на диск показано стрелкой. При увеличении веса



1 – оптическое волокно, 2 – металлический стержень, 3 – диск, 4 – демпфер, 5 – основание стола, 6 – источник света, 7 – измеритель оптической мощности

Рисунок 1 – Схема измерений

нагрузки на диск металлические стержни с большей силой давили на ОВ, что приводило к формированию большего угла микроизгиба, что в свою очередь вело к увеличению уровня дополнительных потерь оптической мощности. При проведении эксперимента длина оптического волокна составила около одного метра, но при необходимости длина может быть увеличена до нескольких десятков километров. Например, точка измерения может находиться от источника излучения и фотоприемника на расстоянии 30-40 км. Это позволит создать различные измерители нагрузки и веса, работающие дистанционно, при этом самой точке измерения не требуется дополнительное электропитание.

На рисунке 2 показано фото лабораторного стенда и приборов, использованных в экспериментах.

Результаты исследований

Результаты исследований дополнительных потерь оптической мощности, возникающих при механическом изгибе оптического волокна стандарта G652 представлены графиком зависимости роста дополнительных потерь в зависимости от приложенной нагрузки в диапазоне от 0 до 10 кг (рисунок 4). Результаты эмпирических исследований показали, что дополнительные потери в ОВ растут с увеличением нагрузки. Рост дополнительных потерь зависят от величины нагрузки и от длины волны. Установлено, что потери при микроизгибе при длине волны 1310 нм меньше, чем при длине волны 1550 нм, это видно из графика, представленного на рисунке 3.

Наблюдается обратный эффект, который характерен для окон прозрачности ОВ, ког-

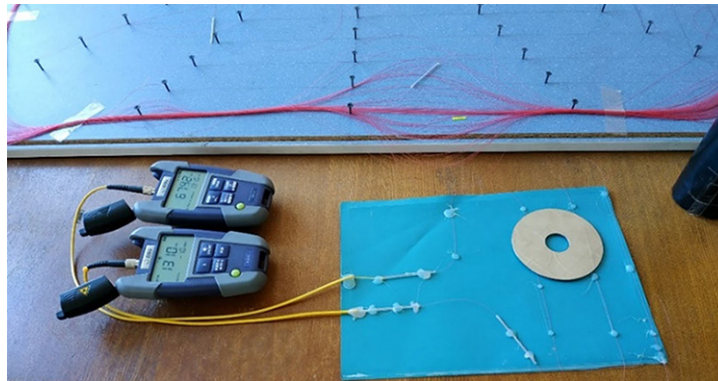


Рисунок 2 – Фото лабораторного стенда

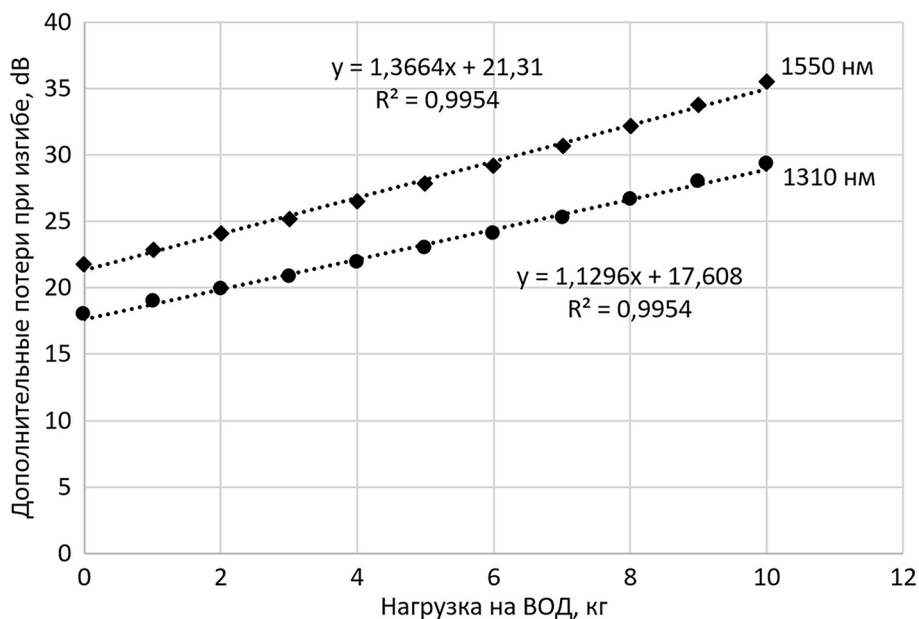


Рисунок 3 – График зависимости роста дополнительных потерь от приложенной нагрузки при длине волны 1331 и 1550 нм

да с увеличением длины оптической волны снижаются потери в ОВ [12-16], это характерно для случая, когда отсутствует изгиб ОВ. При наличии изгиба наблюдается возникновение фотоупругого эффекта, при котором изменяются параметры преломления ОВ и часть излучения безвозвратно покидает сердцевину ОВ, что можно характеризовать как дополнительные потери, сформированные при механическом воздействии на боковую грань ОВ. Относительная погрешность измерений составила 2,112%, коэффициент Стьюдента 1,092 с доверительным интервалом 0,95.

Обсуждения и выводы

Данный метод позволяет контролировать вес на расстоянии до 40 км с энергозатратами менее 1 Вт. ОВ может быть использовано одновременно как канал передачи сигналов и как датчик нагрузки. Например, можно создать устройства для дистанционного автоматического контроля контролировать вес

проезжающего по дорожному полотну или мосту автотранспорта. Например, использовать предлагаемый датчик для измерения скорости автомобиля, едущего по дороге с твердым покрытием. Точка измерения может находиться в значительном удалении от блока измерения. Например, можно контролировать вес автотранспорта, проезжающего по мосту или определенному участку дороги. Попутно можно измерить скорость передвижения автомобиля, если расположить датчики на определенном расстоянии друг от друга.

Данная научная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН №BR19980899 «Разработка системы мониторинга геотехнического состояния горных выработок шахт и карьеров на основе интеллектуальных волоконно-оптических датчиков», в рамках программно-целевого финансирования Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буймистряк, Г.Я. Принципы построения интеллектуальных волоконно-оптических датчиков // Фотон-Экспресс. – 2011. – № 6 (43). – С. 38-39.
2. Indra, A. Industrial fiber optics in train transportation systems. – Avago Technologies. White Papers. – 2012. – 4 p.
3. Guofeng, W. Methods for increasing the Bandwidth-Distance Product for multimode fibers in LAN // Journal of Optical Communication. – 2008. – Vol. 29 (4). – Pp. 213-216.
4. Буймистряк, Г. Волоконно-оптические датчики для экстремальных условий // Control Engineering, Россия. – 2013. – № 3 (45). – С. 34-40.
5. Kim, S.T., Park, Y.-H., Park, S.Y., Cho, K., Cho, J.-R.A. Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces // Sensors. – 2015. – 15 (1) – Pp. 1060-1070.
6. Liu, T., Wei, Y., Song, G., Li Y., Wang, J., Ning, Y., Lu, Y. Advances of Optical Fiber Sensors for Coal Mine Safety Monitoring Applications // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. – 2013. – Pp. 102-111.
7. Ding, M., Fan, D., Wang, W., Luo, Y., Peng, G-D. Basics of Optical Fiber Measurements // Handbook of Optical Fibers. – 2018. – 39 p.
8. Шишкин, В.В., Гранёв, И.В., Шелемба, И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – № 1 (3). – С. 61-75.
9. Yurchenko, A.V., Mekhtiyev, A.D., Bulatbaev, F.N., Neshina, Y.G., Alkina, A.D., Madi, P.Sh. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action // III International Conference «Cognitive Robotics» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – No. 516 (012004) IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/516/1/012004
10. Mekhtiyev, A.D., Kovtun, A.A., Yugay, V.V., Neshina, E.G., Aimagambetova, R.Z., Alkina, A.D. Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF) Metalurgija. – 2021. – No. 60 (1-2). – Pp. 121-124. Preuzetos <https://hrcak.srce.hr/246106>
11. Shyh-Lin Tsao & Wen-Ming Cheng. Упрощенная формула потерь на изгиб для оптоволоконных датчиков, волокна и интегрированной оптики. – 2002. – № 21:5. – С. 333-344, doi: 10.1080 / 10468030290087723

12. Amorebietà, J., Ortega-Gomez, A., Durana, G., et al. Compact omnidirectional multicore fiber-based vector bending sensor. – 2021. – No. **11**. – 5989 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85507-9>.
13. Yong, Zheng, Wang, Xiao, Zheng-Wei Zhu, A simple macro-bending loss optical fiber crack sensor for the use over a large displacement range, Optical Fiber Technology. – 2020. – Volume 58. – 102280 p. ISSN 1068-5200, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102280>.
14. Yong, Zheng, Jie, Yu, Zheng-Wei Zhu, Bin, Zeng, Chao, Yang. Design, sensing principle and testing of a novel fiber optic displacement sensor based on linear macro-bending loss, Optik. – 2021. – Volume 242. – 167194 p., ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167194>.
15. Abdul, Ghaffar, Mujahid, Mehdi, Sadam, Hussain, Nadir, Hussian, Sikandar, Ali, Su, JianHui, JunQi, Pang, WenYi, Liu. The coupling of scattered-bend loss in POF based the displacement measurement sensor, Sensing and Bio-Sensing Research. – 2020. – Volume 29. 100351 p. ISSN 2214-1804, <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100351>.
16. Yurchenko, A.V., Gorlov, N.I., Alkina, A.D., Mekhtiev, A.D., Kovtun, A.A. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long // IOP Science. Journal of Physics. – 2020. – No. **671** (012001) doi: 10:1088/1742-6596/671/1/012001.

G.652 стандартты оптикалық талшықтың механикалық иілуінен туындайтын оптикалық қуаттың қосымша шығындарын зерттеу

¹**МЕХТИЕВ Али Джаванширович**, т.ғ.к., профессор, barton.kz@mail.ru,

²**АЛЬКИНА Алия Даулетхановна**, аға оқытушы, alika_1308@mail.ru,

²**НЕШИНА Елена Геннадьевна**, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі, 1_neg@mail.ru,

^{2*}**КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич**, PhD, кафедра меңгерушісі, 90nurbol@mail.ru,

¹**МУСАГАЖИНОВ Мадияр Жалелович**, докторант, musagazhinov@bk.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақала талшықты-оптикалық ақпарат беру желілеріне балама құру мәселелеріне арналған. Қазақстан Республикасының телекоммуникация жүйелері жұмысының проблемаларының бірі – ФТТ деректерді беру жүйелеріндегі сигналдардың әлсіреуі қаралды. Иілуге жеткілікті сезімтал G.652-656 оптикалық талшықты қолданудың негізгі идеясы сипатталған. Жергілікті кәсіпорындарда G.652 стандарты негізінде талшықты-оптикалық кабельдер мен патч-кордтарды шығару игерілді. Иілу жарық толқынының қуатын жоғалтады, режимнің таралу фазасын өзгертеді және сигналдың әлсіреуіне әкеледі, онда абоненттер Интернет желісінде қалыпты жұмыс істей алмайды. Микро иілудің әртүрлі түрлері еліктелген. Шағын радиусты оптикалық талшықтың микро иілісі оның зақымдалуына әкеледі. Бұл жағдай талшықты-оптикалық кабельді орнату технологиясы бұзылған кезде пайда болады. Жұмыста бұрыштардың санына, олардың дәрежесіне және оптикалық сәулеленудің толқын ұзындығына байланысты иілу кезінде пайда болатын қосымша шығындардың сипаттамаларын құруға байланысты жаңа ғылыми нәтижелер алуға бағытталған зерттеулер жүргізілді. Микро-иілу кезінде қосымша шығындарды бақылауға негізделген датчиктерді әзірлеу, сондай-ақ талшықты-оптикалық желілер арқылы берілетін ақпаратты қорғау жүйелерін құру үшін одан әрі пайдалану туралы қорытындылар берілген. Зерттеулер берілген параметрлер бойынша жуықтау құрылысының дәлдігін бағалай отырып, қосымша шығындарды сандық есептеуге арналған бағдарламалық жасақтаманы әзірлеуге бағытталған: ОТ өзегіне таралатын оптикалық сәулеленудің иілу саны, бұрышы және толқын ұзындығы.

Кілт сөздер: оптикалық талшық, сигналдың әлсіреуі, микро иілу, фотоэластикалық эффект, жарық толқыны, режимнің таралу фазасы, радиус, қорғаныс әдістері мен құралдар, қосымша шығындар.

Investigation of Additional Optical Power Losses Arising from Mechanical Bending of an Optical Fiber of the G.652 Standard

¹**MEKHTIEV Ali**, Cand. of Tech. Sci., Professor, barton.kz@mail.ru,

²**ALKINA Aliya**, Senior Lecturer, alika_1308@mail.ru,

²**NESHINA Yelena**, Cand. of Tech. Sci., Head of Department, 1_neg@mail.ru,

^{2*}**KALIASKAROV Nurbol**, PhD, Head of Department, 90nurbol@mail.ru,

¹**MUSAGAZHINOV Madiyar**, Doctoral Student, musagazhinov@bk.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Zhenis Avenue, 62, Astana, Kazakhstan,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

*corresponding author.

Abstract. The article is devoted to the issues of creating an alternative to fiber-optic information transmission lines. One of the problems of the telecommunications systems of the Republic of Kazakhstan is considered – signal attenuation in FTT data transmission systems. The main idea of using an optical fiber of the G.652-656 standard, which is quite sensitive to bends, is described. Local enterprises have mastered the production of fiber-optic cables and patch cords based on the G standard.652. Bending causes a loss of light wave power, changes the phase of propagation of the mode and leads to signal attenuation, in which subscribers cannot work normally on the Internet. In this article, various types of micro-bends were simulated. Micro-bends of the optical fiber with a small radius leads to its damage. This situation occurs when the fiber optic cable installation technology is violated. The work carried out studies aimed at obtaining new scientific results related to the construction of characteristics of additional losses arising from the bending of OF depending on the number of angles, their degree and wavelength of optical radiation. Conclusions are presented on the further use for the development of sensors based on the control of additional losses during micro-bending, as well as the creation of information protection systems transmitted over fiber-optic lines. The research is aimed at developing software for the numerical calculation of additional losses with an assessment of the accuracy of constructing an approximation according to specified parameters: the number of bends, angle and wavelength of optical radiation propagating through the core of the OF.

Keywords: optical fiber, signal attenuation, micro-bending, photoelastic effect, light wave, mode propagation phase, radius, methods and means of protection, additional losses.

REFERENCES

1. Buymistryuk, G.Ya. Printsipy postroeniya intellektual'nykh volokonno-opticheskikh datchikov // Foton-Ekspress. – 2011. – No. 6 (43). – Pp. 38-39.
2. Indra, A. Industrial fiber optics in train transportation systems. – Avago Technologies. White Papers. – 2012. – 4 p.
3. Guofeng, W. Methods for increasing the Bandwidth-Distance Product for multimode fibers in LAN // Journal of Optical Communication. – 2008. – Vol. 29 (4). – Pp. 213-216.
4. Buymistryuk, G. Volokonno-opticheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy // Control Engineering, Russia. – 2013. – No. 3 (45). – Pp. 34-40.
5. Kim, S.T., Park, Y.-H., Park, S.Y., Cho, K., Cho, J.-R.A. Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces // Sensors. – 2015. – 15 (1) – Pp. 1060-1070.
6. Liu, T., Wei, Y., Song, G., Li Y., Wang, J., Ning, Y., Lu, Y. Advances of Optical Fiber Sensors for Coal Mine Safety Monitoring Applications // Proceedings of the 2013 International Conference on Microwave and Photonics. – 2013. – Pp. 102-111.
7. Ding, M., Fan, D., Wang, W., Luo, Y., Peng, G.-D. Basics of Optical Fiber Measurements // Handbook of Optical Fibers. – 2018. – 39 p.

8. Shishkin, V.V., Granev, I.V., Shelemba, I.S. Otechestvennyy opyt proizvodstva i primeneniya volokonno-opticheskikh datchikov // Prikladnaya fotonika. – 2016. – No. 1 (3). – Pp. 61-75.
9. Yurchenko, A.V., Mekhtiyev, A.D., Bulatbaev, F.N., Neshina, Y.G., Alkina, A.D., Madi, P.Sh. Investigation of additional losses in optical fibers under mechanical action // III International Conference «Cognitive Robotics» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – No. 516 (012004) IOP Publishing doi: 10.1088/1757-899X/516/1/012004
10. Mekhtiyev, A.D., Kovtun, A.A., Yugay, V.V., Neshina, E.G., Aimagambetova, R.Z., Alkina, A.D. Research of mechanical stress at tension of quartz optical fiber (QOF) Metalurgija. – 2021. – No. 60 (1-2). – Pp. 121-124. Preuzetos <https://hrcak.srce.hr/246106>
11. Shyh-Lin Tsao & Wen-Ming Cheng. Uproshchennaya formula poter' na izgib dlya optovolokonnykh datchikov, volokna i integrirovannoy optiki. – 2002. – No. 21:5. – Pp. 333-344, doi: 10.1080/01468030290087723
12. Amorebieta, J., Ortega-Gomez, A., Durana, G., et al. Compact omnidirectional multicore fiber-based vector bending sensor. – 2021. – No. 11. – 5989 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85507-9>.
13. Yong, Zheng, Wang, Xiao, Zheng-Wei Zhu, A simple macro-bending loss optical fiber crack sensor for the use over a large displacement range, Optical Fiber Technology. – 2020. – Volume 58. – 102280 p. ISSN 1068-5200, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102280>.
14. Yong, Zheng, Jie, Yu, Zheng-Wei Zhu, Bin, Zeng, Chao, Yang. Design, sensing principle and testing of a novel fiber optic displacement sensor based on linear macro-bending loss, Optik. – 2021. – Volume 242. – 167194 p., ISSN 0030-4026, <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167194>.
15. Abdul, Ghaffar, Mujahid, Mehdi, Sadam, Hussain, Nadir, Hussian, Sikandar, Ali, Su, JianHui, JunQi, Pang, WenYi, Liu. The coupling of scattered-bend loss in POF based the displacement measurement sensor, Sensing and Bio-Sensing Research. – 2020. – Volume 29. 100351 p. ISSN 2214-1804, <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100351>.
16. Yurchenko, A.V., Gorlov, N.I., Alkina, A.D., Mekhtiev, A.D., Kovtun, A.A. Research of the additional losses occurring in optical fiber at its multiple bends in the range waves 1310 nm, 1550 nm and 1625 nm Long // IOP Science. Journal of Physics. – 2020. – No. 671 (012001) doi: 10:1088/1742-6596/671/1/012001.