



УДК 681.7.068

ВЫБОР СПОСОБА НАМОТКИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ОБЪЕКТОМ

В.А. Лопарев^a, С.С. Киселев^a, М.М. Шилин^b^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, 194044, Российская ФедерацияАдрес для переписки: kss212@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.04.17, принята к печати 16.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-612-619

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Лопарев В.А., Киселев С.С., Шилин М.М. Выбор способа намотки для технической реализации волоконно-оптической линии связи с высокоскоростным объектом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 612–619. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-612-619

Аннотация

Исследованы способы намотки волоконно-оптического кабеля для реализации волоконно-оптической линии связи с высокоскоростным объектом. Рассмотрены варианты катушек для намотки оптического кабеля, обеспечивающие подвижность одного из концов кабеля на объекте. Показано, что выбор способа намотки обуславливается необходимостью обеспечения минимальной деформации волоконно-оптического микрокабеля при отрыве от тела намотки. Выявлено, что минимальная величина натяжения и ее неравномерность наблюдаются при смотке с катушек ракетной формы. Приведены расчетные соотношения для определения параметров намотки. Показано, что уменьшение неравномерности натяжения снижает скачки внутренних напряжений, а также уменьшает вероятность обрыва и возникновения локального затухания оптического сигнала. Снижение внутренних напряжений связано с отсутствием перехлеста витков нижележащих слоев с вышележащими. Для подтверждения работоспособности и конструктивной реализации выбранной схемы намотки проведены эксперименты по выполнению ракетной и других видов намотки с использованием специально спроектированного макета станка. Показано, что применение рядной ракетной намотки позволяет добиться стабильности при смотке кабеля в процессе движения и исключает обрывы. Оптические потери уменьшаются за счет увеличения минимального радиуса изгиба, что объясняется уменьшением внутренних напряжений, вызывающих затухание оптического сигнала в месте отрыва кабеля от катушки.

Ключевые слова

схема намотки, волоконно-оптические линии связи, высокоскоростной объект, размотка, катушка

WINDING METHOD SELECTION FOR TECHNICAL IMPLEMENTATION OF FIBER OPTIC COMMUNICATION LINE FOR HIGH-SPEED OBJECT

V.A. Loparev^a, S.S. Kiselev^a, M.M. Shilin^b^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^b JSC "Concern "Sea Underwater Weapon – Gidropribor", Saint Petersburg, 194044, Russian FederationCorresponding author: kss212@mail.ru

Article info

Received 21.04.17, accepted 16.06.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-612-619

Article in Russian

For citation: Loparev V.A., Kiselev S.S., Shilin M.M. Winding method selection for technical implementation of fiber optic communication line for high-speed object. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 612–619 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-612-619

Abstract

The paper deals with fiber-optical cable winding methods for realization of fiber-optic communication line with high-speed object. We consider possible options of coils for optical cable winding providing mobility of one of the cable ends on an object. It is shown that the choice of a winding process is caused by the need of ensuring the minimum deformation of fiber-optical micro cable in case of separation from a winding body. It is revealed that the minimum tension value and its unevenness are observed when reeling from coils with a rocket form. Design ratios for determination of winding parameters are given. It is shown that reduction of tension unevenness reduces the jumps of internal tension and probability of break and

emergence of optical signal local attenuation. Decrease in internal stresses occurs due to the absence of overlapping of the coils of the underlying layers with the overlying ones. To confirm the operability and the possibility of constructive implementation of the selected winding scheme, experiments were carried out to perform rocket and other types of winding with the use of a specially designed machine model. It is shown that the application of line rocket winding enables to achieve stability when reeling a cable during the movement and excludes breaks. Attenuation of optical signal decreases due to the increase in the bend minimum radius. This phenomenon is explained by reduction of the internal stresses causing optical signal attenuation in the place of cable separation from the coil.

Keywords

winding scheme, fiber-optic communication lines, high-speed object, unwinding, coil

Введение

Для некоторых задач, связанных с организацией связи с высокоскоростными объектами (свыше 10 м/с) при повышенных требованиях к объему, скорости, помехозащищенности и низкой зависимости от среды распространения, требуется отличный от радиосигнала способ передачи сигнала. Таким способом является использование волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), обладающей принципиальным отличием от существующих: один из ее концов является подвижным и высокоскоростным, а необходимый запас дальности обеспечивается катушкой (рис. 1), с которой происходит сматывание кабеля.

Сигнал передается по всей длине волоконно-оптического кабеля, поэтому важно обеспечить целостность кабеля по всей длине. При этом очевидно, что в месте отрыва кабеля от катушки, где он неподвижен, скорость изменяется от нуля до скорости объекта и снова изменяется до нулевой скорости среды. В связи с этим форма намотки кабеля в катушке является одним из основных факторов обеспечения связи, наряду с качественными характеристиками составных частей.

Исследованию влияния формы катушки на возникающие силы посвящены работы [1–4]. Большие нагрузки в месте отрыва кабеля вызывают большие напряжения в волокне, что приводит к большим внутренним напряжениям, а следовательно – к изменению коэффициентов преломления, увеличению затухания оптического сигнала и в пределе – к полной его потере.

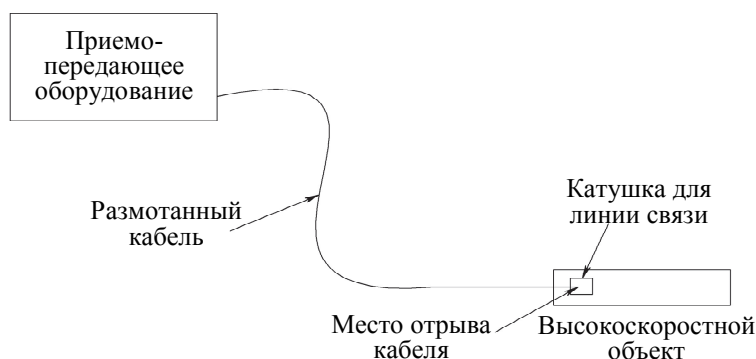


Рис. 1. Схема линии связи с подвижным объектом

Необходимо учитывать и тот факт, что часть волокна – кабеля находится на катушке, а при намотке катушки обязательно присутствует минимальное осевое усилие, чтобы преодолеть упругость. В зависимости от способа намотки могут иметь место пересечения волокон в ряду с нижележащим слоем, и в месте пересечения возникают напряжения, что приводит к рассеянию оптического излучения. При формировании катушки возникают погрешности намотки, что также может привести к потере сигнала [5–8].

Таким образом, формирование катушки является основополагающим фактором работоспособности ВОЛС с подвижными объектами.

Анализ существующих вариантов намотки

Существуют различные реализации катушек [9–12]. Два основных типа катушек для высокоскоростной размотки отличаются конструкцией – каркасной или бескаркасной. Тип катушки характеризует направление смотки – снаружи контура или внутри соответственно [13]. Для каждого конкретного устройства тип смотки подбирается отдельно, исходя из заданного объема хранения кабеля и его механических характеристик. Так, внутренняя смотка больше подходит для больших объемов и применения волоконно-оптического микрокабеля (ВОМК), так как у данного типа кабеля высокая упругость и существенные ограничения на минимальный радиус изгиба [14–17]. При такой смотке для изгиба кабеля используется внутренний объем намотанного контура.

Для создания технической реализации ВОЛС с подвижным объектом были рассмотрены существующие способы намотки.

Наиболее известны такие формы намотки [9–11], как цилиндрическая, коническая, ракетная (рис. 2).

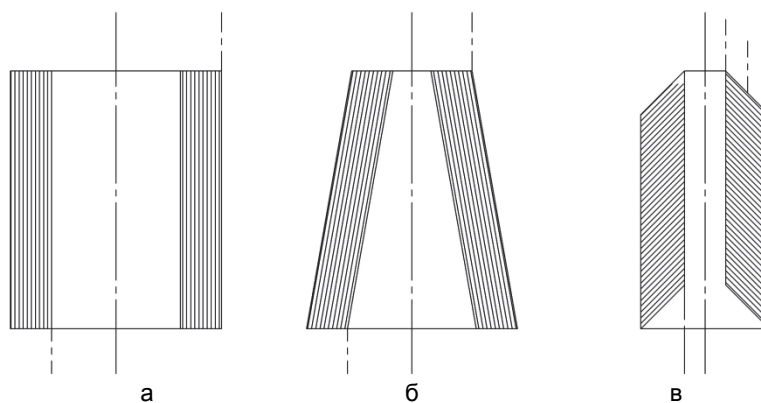


Рис. 2. Формы намотки: цилиндрическая (а); коническая (б); ракетная (в)

Цилиндрическая форма намотки является самой простой и используется в тех случаях, когда намотка производится на катушку с фланцами на всю высоту намотки. При данной намотке скорость размотки невысока, так как в большинстве случаев требуется вращение катушки.

Коническая форма намотки наиболее распространена в текстильной промышленности. Такая намотка обычно производится на катушки без фланцев. Коническая форма каркаса позволяет сократить количество «слетов» витков на малый торец контура при разматывании, так как витки, расположенные у большого торца контура, не задевают при сходе за витки, лежащие у малого торца, и не захватывают их с собой, образуя «слет». Для снижения вероятности образования слетов витков на больший торец каркаса в конструкцию мотальных машин вводятся механизмы сферообразования.

Ракетная форма намотки также используется в текстильной промышленности, однако распространена гораздо меньше конической формы, так как используется в основном для пряжи большой линейной плотности в бобинах массой 5–7 кг. Однако А.И. Панин [18] провел эксперимент по замеру натяжения нити при смотке с бобин различных форм. Результаты его эксперимента показаны на рис. 3.

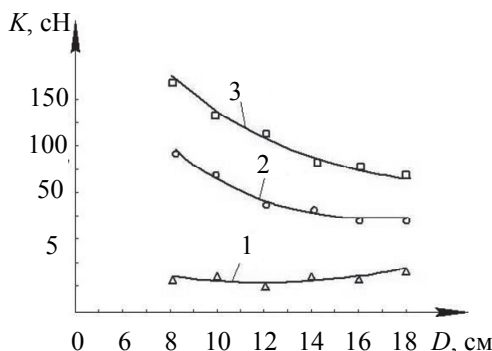


Рис. 3. Зависимость натяжения нити (K , сН) от диаметра (D , см) при различных формах намотки [9]: при работе с бобиной ракетной формы (1); при работе с конической намоткой (2); при работе с цилиндрической намоткой (3)

Из анализа данных можно сделать вывод о том, что максимальное снижение неравномерности натяжения будет наблюдаться при смотке с катушек ракетной формы. За счет снижения неравномерности натяжения [19] снижаются скачки внутренних напряжений, что важно для ВОМК, так как уменьшается вероятность обрыва и возникновения локального затухания оптического сигнала.

Таким образом, применение ракетной намотки позволит использовать ВОМК в катушках связи с подвижными объектами.

Особенности объекта исследования, влияющие на выбор схемы намотки

Важным критерием выбора типа намотки является ее плотность и, как следствие, длина кабеля, уместаемая в заданный объем, который расположен на носителе. Наибольшей плотностью обладает рядная намотка, однако при ее использовании необходимо точно управлять усилием намотки для обеспечения требуемой структуры. Сомкнутая намотка не требует точного управления усилием намотки, но и обладает пониженной плотностью намотки. Наименьшая плотность достигается при использовании замкнутой намотки, при которой возможно формирование структуры с заданной степенью разреженности. На рис. 4 показаны схемы намотки: рядная (рис. 4, а), сомкнутая (рис. 4, б), замкнутая (рис. 4, в).

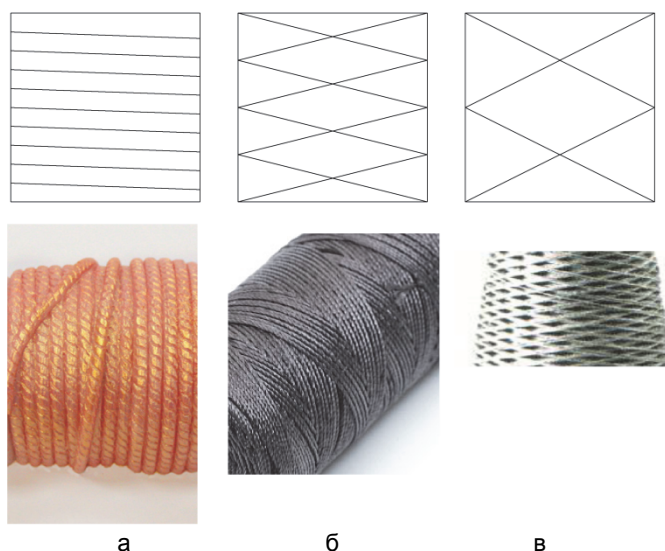


Рис. 4. Схемы намотки: рядная (а); сомкнутая (б); замкнутая (в)

Особенность применения ВОМК для связи с подвижным объектом заключается в том, что при размотке возникают напряжения, оказывающие влияние на итоговое затухание оптического сигнала. Эти напряжения складываются из трех компонентов – напряжения на размотанной части, вызванные гидростатическим давлением воды, напряжения в теле намотки, вызванные давлением верхних слоев кабеля на нижние и неравномерностью намотки, а также напряжения, возникающие в момент отрыва кабеля от тела намотки (рис. 1). Другой особенностью является высокая скорость сматывания: при наружном диаметре катушки 400 мм и скорости движения 30 м/с угловая скорость может достигать 2500 об/мин.

Наибольший вклад в итоговое затухание сигнала вносят напряжения, вызванные деформацией кабеля в момент отрыва от тела намотки, так как в этой области образуются минимальные радиусы изгиба и, как следствие, максимальные напряжения (рис. 5).

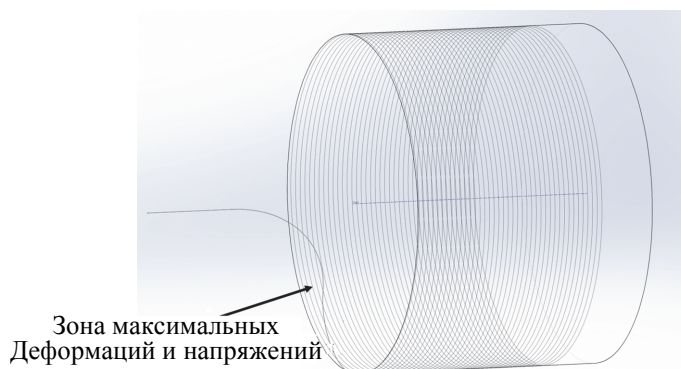


Рис. 5. Модель смотки

Следует отметить, что других источников напряжений, кроме указанных выше, нет, либо они вносят незначительный вклад в затухание оптического сигнала. Это связано с тем, что размотанная часть кабеля находится в среде практически неподвижно, и на нее не действуют никакие локально сосредоточенные силы. Осевое усилие, за счет которого осуществляется смотка, возникает локально в зоне, показанной на рис. 5, т.е. в непосредственной близости от катушки, причем эта зона постоянно перемещается вслед за катушкой.

Описание выбранной схемы намотки

С учетом всех особенностей объекта исследования предлагается использовать ракетную намотку, в которой отрыв кабеля от тела намотки происходит по нормали к поверхности намотки (рис. 6). Таким образом, при размотке кабель изгибается один раз под углом, близким к 90° , что исключает возможность подхлестывания, т.е. схода нескольких витков сразу за счет зацепления одним витком другого. При использовании такой намотки контур состоит из рядов кабеля не от меньшего диаметра к большему, а от одного торца к другому. Иначе говоря, один ряд представляет собой коническую спираль с углом наклона α образующей линии конической поверхности намотки к оси катушки, причем ряды в нечетных рядах уложены от меньшего диаметра к большему, а в четных рядах – от большего диаметра к меньшему.

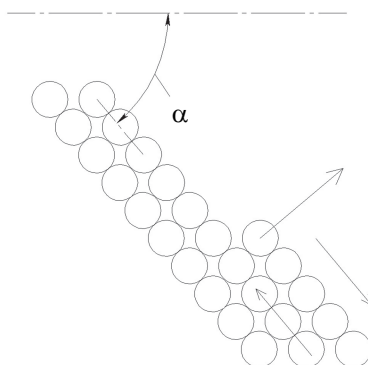


Рис. 6. Схема смотки (стрелками показано направление схода кабеля внутрь катушки и схода по рядам – сначала от меньшего диаметра к большему, затем от большего диаметра к меньшему)

Предлагаемый способ намотки ВОМК позволяет добиться одинакового натяжения при смотке в течение всего процесса разматки как с нижележащих слоев, так и с вышележащих, что снижает вероятность обрыва кабеля при возрастании усилия, удерживающего его на теле намотки.

Другим преимуществом является отсутствие внутренних напряжений. Это связано с отсутствием перехлеста витков нижележащих слоев с вышележащими, т.е. вышележащие витки соприкасаются с нижележащими по линии, а не по точке, что обеспечивает минимальное давление.

На основе рассмотренных преимуществ и недостатков существующих схем намотки был сделан вывод о целесообразности технической реализации волоконно-оптической линии связи с подвижным объектом с использованием рядной ракетной намотки, представляющей собой динамическую систему с разматывающимся волоконно-оптическим кабелем.

Расчет параметров намотки

Для расчета ракетной намотки можно пользоваться формулами для цилиндрической намотки, с учетом особенностей ракетной намотки. На рис. 7 показана модель ракетной намотки.

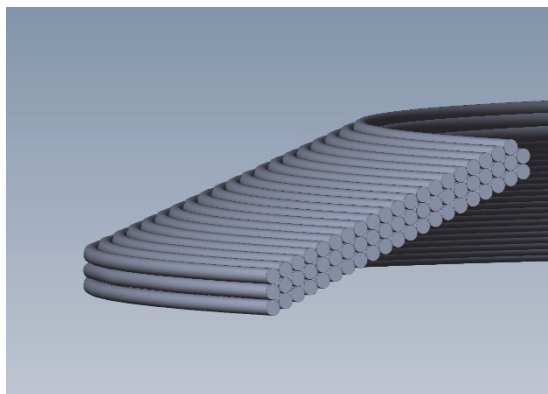


Рис. 7. Модель ракетной намотки

Входными данными для расчета являются длина волокна, диаметр волокна, внешний диаметр катушки, длина катушки. Для расчета используются соотношения, полученные из известных геометрических выражений.

Диаметр n -го ряда вычисляется по формуле

$$D_n = D_{n-1} - 2 \cdot d \cdot \cos(\alpha),$$

где d – диаметр волокна; α – угол ракетной намотки к основанию, при использовании угла к оси намотки косинус заменяется на синус.

Остаток волокна равен

$$L_n = L_{n-1} - D_n \frac{L_{кат}}{d},$$

где $L_{кат}$ – длина катушки.

На основе входных данных и известного угла намотки рассчитываются следующие параметры: количество рядов ракетной намотки; расчетный внутренний диаметр; расчетная максимальная длина окружности; расчетная минимальная длина окружности.

Рассчитанные параметры используются при проектировании катушки и настройки станка по ее намотке.

В качестве конкретного примера предлагается катушка для беспилотных воздушных летательных аппаратов, имеющая следующие характеристики: длина намотанного волоконно-оптического кабеля – 1000 м, диаметр кабеля – 300 мкм, наружный диаметр тела намотки – 45 мм, внутренний диаметр – 32 мм, длина – 107 мм, количество рядов – 330, угол $\alpha = 60^\circ$.

Практическая апробация схемы намотки

Для подтверждения работоспособности были проведены эксперименты по выполнению ракетной намотки с использованием макета станка. Эксперименты проводились на различных объектах намотки и на различных конфигурациях катушки. Эксперименты носили качественный характер. Их целью являлось исследование принципиальной возможности ракетной намотки волоконно-оптического кабеля.

Для эксперимента был разработан станок (рис. 8). Он позволяет осуществлять цилиндрическую, коническую и ракетную намотку на катушки небольших габаритов (максимальным диаметром 40 мм и длиной 60 мм). Станок управляется двумя шаговыми приводами, имеет силиконовый ролик прижима волокна к катушке.

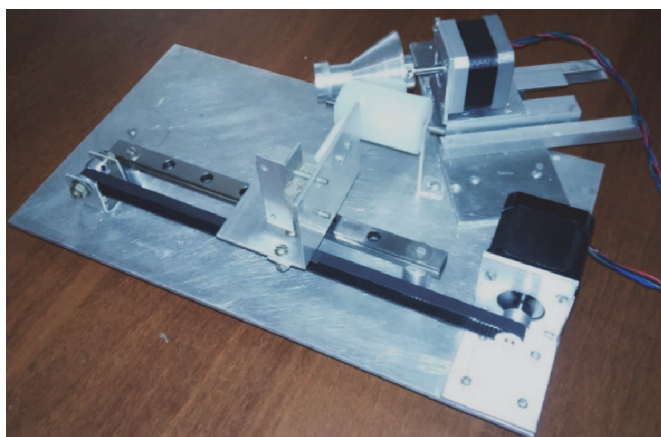


Рис. 8. Станок для экспериментальной намотки

В качестве волокна использовались леска диаметром 0,45 мм и оптическое волокно в оболочке диаметром 0,2 мм. Намотка осуществлялась в полуавтоматическом режиме, т.е. каретка с укладчиком перемещалась вручную.

Так как о веществах, применяемых для катушек скоростного выпуска оптического кабеля, информации не найдено, для фиксации витков были опробованы различные материалы: воск, парафин, стеарин, силикатный клей. Основные требования к связующему – быстрая фиксация и минимальное усилие отрыва.

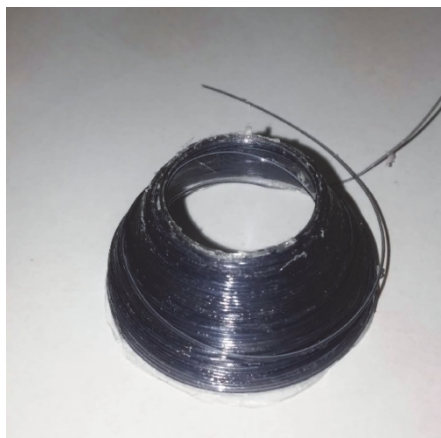


Рис. 9. Образец, полученный с использованием силикатного клея

В ходе первых экспериментов было выявлено следующее.

Угол 45° не позволяет осуществить намотку виток к витку вследствие соскакивания. Необходимо точный контроль натяжения при укладке в области минимальных значений. Угол 30° позволяет проводить намотку виток к витку. Необходимо связующее средство, быстро и надежно фиксирующее ВОМК, но обеспечивающее минимальное усилие отрыва.

При апробации различных связующих в процессе намотки наилучший результат показал силикатный клей, обеспечивающий быструю фиксацию (рис. 9), а также невысокое усилие на отрыв. Наихудший

результат был получен при использовании парафина – фиксация оказалась недостаточной даже для сопротивления внутренним напряжениям в наматываемом образце.

Заключение

На основе приведенных данных был сделан вывод, что применение рядной ракетной намотки позволит добиться стабильности при смотке кабеля в процессе движения, исключить обрывы, уменьшить оптические потери за счет увеличения минимального радиуса изгиба и, как следствие, уменьшить внутренние напряжения, вызывающие затухание оптического сигнала в месте отрыва кабеля от катушки.

Литература

1. Свинцов А.Г. ВОСП и защита информации // Фотон-Экспресс. 2009. № 1. С. 34–38.
2. Lea R.K., Allen R., Merry S.L. A comparative study of control techniques for an underwater flight vehicle // *International Journal of Systems Science*. 1999. V. 30. N 9. P. 947–964. doi: 10.1080/002077299291831
3. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 282 с.
4. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Сайрус системс, 1999. 664 с.
5. Шрамко О.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Аксарин С.М. Метод исследования зависимости h-параметра анизотропного световода от радиуса изгиба // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2014. № 1 (89). С. 26–31.
6. Аксарин С.М., Архипов С.В., Варжель С.В., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование зависимости параметров анизотропных одномодовых волоконных световодов от диаметра намотки // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 6(88). С. 22–26.
7. Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2010. Т. 53. № 2. С. 47–51.
8. Мешковский И.К., Унтилов А.А., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 7. С. 76–80.
9. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. I. Theory of yarn-unwinding // *Journal of the Textile Institute*. 1979. V. 70. N 3. P. 89–95. doi: 10.1080/00405007908631523
10. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. II. Unwinding from cylindrical packages // *Journal of the Textile Institute*. 1979. V. 70. N 3. P. 96–104. doi: 10.1080/00405007908631524
11. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. III. Unwinding from conical packages // *Journal of the Textile Institute*. 1979. V. 70. N 5. P. 172–183. doi: 10.1080/00405007908658794
12. Панин А.И. Исследование и разработка структур мотальных паковок, обеспечивающих оптимальный процесс сматывания: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2004. 169 с.
13. Kim K.W., Lee J.W., Yoo W.S. Unwinding characteristics of thin cables for inner and outer dispensers // *Nonlinear Dynamics*. 2013. V. 72. N 1-2. P. 333–351. doi: 10.1007/s11071-012-0717-3
14. Kim K.W., Lee J.W., Yoo W.S. Verification of simulation for unwinding motion of cable in water by physical experiment // *Nonlinear Dynamics*. 2014. V. 77. N 3. P. 553–568. doi: 10.1007/s11071-014-1317-1
15. Akiyama A., Shibata M., Araki S., Ishii H. A theory of unwinding optic fiber's motion for fiber optic data link bobbin // *Electronics and Communications in Japan, Part I: Communications*. 2002. V. 85. N 3. P. 61–73. doi: 10.1002/ecja.1084
16. Optical Fibers, Cables and Systems. International Telecommunication Union Manual. Geneva, 2009. 324 p. (In Russian)
17. Волновая оптоэлектроника / под ред. Т. Тамира М.: Мир, 1991. 575 с.

References

1. Svintsov A.G. Fiber optics systems and information safety. *Foton-Ekspress*, 2009, no. 1, pp. 34–38. (In Russian)
2. Lea R.K., Allen R., Merry S.L. A comparative study of control techniques for an underwater flight vehicle. *International Journal of Systems Science*, 1999, vol. 30, no. 9, pp. 947–964. doi: 10.1080/002077299291831
3. Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. *Fiber-Optic Cables and Communication Lines*. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2002, 282 p. (In Russian)
4. Ivanov A.B. *Fiber-Optics: Components, Transmission Systems, Measurements*. Moscow, Sairus Systems Publ., 1999, 664 p. (In Russian)
5. Shramko O.A., Rupasov A.V., Novikov R.L., Aksarin S.M. Analysis method of anisotropic lightguide h-parameter dependence on its bending radius. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1, pp. 26–31. (In Russian)
6. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel' S.V., Kulikov A.V., Strigaleva V.E. Dependence investigation of the anisotropic single-mode fiber parameters on a winding diameter. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6, pp. 22–26. (In Russian)
7. Meshkovsky I.K., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. Defects of optical fiber winding in manufacturing of sensitive element of fiber-optic interferometer. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 47–51. (In Russian)
8. Meshkovsky I.K., Untilov A.A., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. The quality of windings of fiber-optic gyroscope sensor. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 7, pp. 76–80. (In Russian)
9. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. I. Theory of yarn-unwinding. *Journal of the Textile Institute*, 1979, vol. 70, no. 3, pp. 89–95. doi: 10.1080/00405007908631523
10. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. II. Unwinding from cylindrical packages. *Journal of the Textile Institute*, 1979, vol. 70, no. 3, pp. 96–104. doi: 10.1080/00405007908631524
11. Kothari V.K., Leaf G.A.V. The unwinding of yarns from packages. III. Unwinding from conical packages. *Journal of the Textile Institute*, 1979, vol. 70, no. 5, pp. 172–183. doi: 10.1080/00405007908658794
12. Panin A.I. *Research and development of the structures of winding packages, providing the optimal winding process*. Dis. PhD Eng. Sci. Moscow, 2004, 169 p. (In Russian)
13. Kim K.W., Lee J.W., Yoo W.S. Unwinding characteristics of thin cables for inner and outer dispensers. *Nonlinear Dynamics*, 2013, vol. 72, no. 1-2, pp. 333–351. doi: 10.1007/s11071-012-0717-3
14. Kim K.W., Lee J.W., Yoo W.S. Verification of simulation for unwinding motion of cable in water by physical experiment. *Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 77, no. 3, pp. 553–568. doi: 10.1007/s11071-014-1317-1
15. Akiyama A., Shibata M., Araki S., Ishii H. A theory of unwinding optic fiber's motion for fiber optic data link bobbin. *Electronics and Communications in Japan, Part I: Communications*, 2002, vol. 85, no. 3, pp. 61–73. doi: 10.1002/ecja.1084
16. *Optical Fibers, Cables and Systems. International Telecommunication Union Manual*. Geneva, 2009, 324 p. (In Russian)
17. *Guided-Wave Optoelectronics*. Ed. T. Tamir. Springer, 1988, 401 p. doi: 10.1007/978-3-642-97074-0

18. Панин А.И. Построение модели зависимости удельной плотности намотки от угла сдвига витков и толщины наматываемого слоя пряжи // Вестник ДИТУД. 2001. № 3.
19. Иванов С.Н., Быкадоров Р.В. О факторах, влияющих на натяжение нити при осевом сматывании нити с бобин // Известия Вузов. Технология текстильной промышленности. 1974. № 7.
18. Panin A.I. Modeling of the dependence of winding specific density on winding shear angle and thickness of the yarn winding layer. *Vestnik DITUD*, 2001, no. 3. (In Russian)
19. Ivanov S.N., Bykadorov R.V. On the factors, affecting the tension of the yarn during the axial winding of fiber from bobbins. *Izvestiya Vuzov. Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 1974, no. 7. (In Russian)

Авторы

Лопарев Вячеслав Александрович – инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, viper-sl@hotmail.com

Киселев Сергей Степанович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, kss212@mail.ru

Шилин Михаил Михайлович – инженер-программист I категории, АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация, shilin.m.m@mail.ru

Authors

Vyacheslav A. Loparev – engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, viper-sl@hotmail.com

Sergey S. Kiselev – PhD, Associate Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, kss212@mail.ru

Mikhail M. Shilin – 1st rank programming engineer, JSC "Concern "Sea Underwater Weapon – Gidropribor", Saint Petersburg, 194044, Russian Federation, shilin.m.m@mail.ru