

## ОСОБЕННОСТИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЛОЖНОЙ НАМОТКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В. А. ЛОПАРЕВ<sup>1</sup>, С. С. КИСЕЛЕВ<sup>1</sup>, М. М. ШИЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: viper-sl@hotmail.com

<sup>2</sup>Концерн „Морское подводное оружие — Гидроприбор“, 194044, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены факторы, осложняющие намотку оптического волокна, в частности ракетную, такие как жесткость волокна и чувствительность к механическим воздействиям. Для сложной намотки оптического волокна предложен вариант станка, с помощью которого была произведена экспериментальная намотка. Отличительными особенностями станка являются намотка по образующей конуса с применением прижимного ролика и связующего материала, контроль натяжения и положения укладки волокна. Эти решения позволяют формировать бескаркасный контур волоконно-оптического микрокабеля, который устойчив к внешним механическим воздействиям.

**Ключевые слова:** *схема намотки, волоконно-оптические линии связи, катушка, станок для намотки волокна*

**Введение.** Намотка оптического волокна является сложным технологическим процессом, так как волокно обладает высокой чувствительностью к механическим воздействиям, а именно к изгибу, растяжению, кручению. Минимальный радиус изгиба разных типов оптического волокна может варьироваться в значительных пределах, но даже наименьший радиус значительно превышает таковой для металлического кабеля, что накладывает определенные ограничения на технологию намотки, затрудняя процесс формирования катушки. Другим фактором, осложняющим намотку, является собственная жесткость волокна. Эта характеристика связана с диаметром волокна и материалом оболочки — чем больше диаметр волокна и прочнее оболочка, тем выше и жесткость.

Одна из основных областей применения оптического волокна — протяженные высокоскоростные линии передачи информации. При устройстве таких линий применяется волокно, намотанное на транспортные катушки с использованием цилиндрической рядной намотки. Однако в некоторых случаях необходимо получение катушек, намотанных особым способом. Такие катушки применяются, например, в волоконно-оптических гироскопах и волоконно-оптических линиях передачи информации подвижным объектам. При этом в волоконно-оптическом гироскопе катушка выполняет роль чувствительного элемента, а катушка для подвижных объектов должна обеспечивать высокоскоростной сход волокна.

**Особенности ракетной намотки.** Для решения задачи организации связи с высокоскоростными объектами (скорость выше 10 м/с) в условиях повышенных требований к объему и скорости передачи информации, повышения помехозащищенности и снижения зависимости от среды распространения необходимо применение волоконно-оптической линии связи. Такая линия имеет принципиальное отличие от существующих: один из ее концов является

подвижным и высокоскоростным, а необходимый запас дальности обеспечивается параметрами катушки, с которой происходит сматывание волокна.

Для технической реализации такой линии связи необходима катушка с особым способом намотки, при котором будет обеспечиваться надежный сход оптического волокна на высокой скорости с минимальными изгибающими усилиями [1—4].

В работе [5] был определен оптимальный способ намотки (ракетная), при которой отрыв волокна от тела катушки происходит по нормали к ее поверхности. На рис. 1 продемонстрирована схема сматывания волокна (стрелками показано направление схода волокна внутрь катушки и схода по рядам — сначала от меньшего диаметра катушки к большему, затем от большего диаметра к меньшему). Таким образом, при размотке волокно изгибается один раз под углом, близким к  $90^\circ$ , что исключает возможность подхлестывания, т.е. схода нескольких витков сразу за счет зацепления одним витком другого. При использовании такого способа намотки контур состоит из рядов волокна, уложенных на коническую поверхность. Иначе говоря, один ряд представляет собой коническую спираль с углом наклона  $\alpha$  образующей линии конической поверхности к оси катушки, причем нечетные ряды уложены от меньшего диаметра катушки к большему, а четные ряды — от большего диаметра к меньшему.

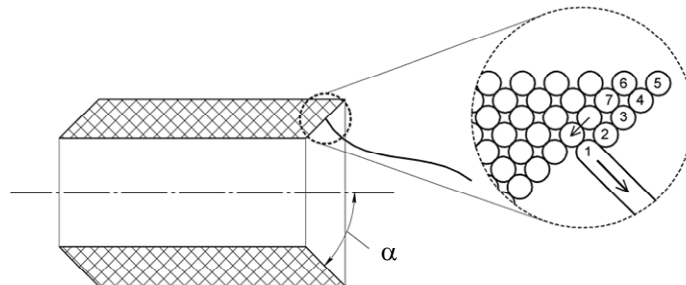


Рис. 1

А. И. Паниным был проведен эксперимент [6] по замеру натяжения нити при сматывании с бобин различных форм. Результаты эксперимента показаны на рис. 2 в виде зависимости натяжения нити ( $K$ ) от ее диаметра ( $D$ ) при различных формах намотки: при работе с катушкой ракетной формы (кривая 1); при работе с конической и цилиндрической намоткой (кривые 2, 3 соответственно).

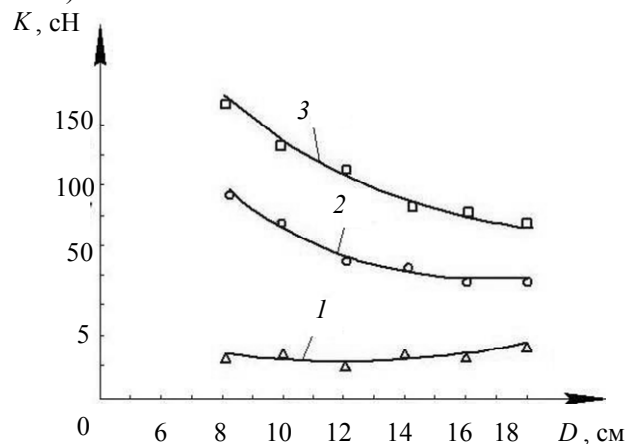


Рис. 2

Ракетный способ намотки оптического волокна позволяет добиться одинаковой силы натяжения при сматывании в течение всего процесса как при минимальном диаметре катушки, так при максимальном, что снижает вероятность обрыва волокна при возрастании усилия, удерживающего его на теле катушки.

Важным параметром ракетной намотки, обеспечивающим достижение поставленной задачи, является угол наклона  $\alpha$  образующей конической поверхности ряда к оси катушки. Этот

угол зависит от наружного, внутреннего диаметра катушки и ее длины и должен обеспечивать сход волокна с минимальным отклонением от нормали к поверхности катушки. Так как угол  $\alpha$  является постоянным и рассчитывается для конкретной точки определенного ряда, то при сматывании с разных рядов происходят отклонения угла отрыва волокна от  $90^\circ$ . Для вычисления оптимального значения этого угла рассматривается середина образующей поверхности ряда, так как при этом абсолютное значение отклонения угла отрыва волокна от нормали будет минимальным. Тогда представляющая собой коническую спираль линия моделирует траекторию схода волокна. Таким образом, угол наклона образующей конической поверхности к оси катушки определяется как

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{\frac{D}{2} - \frac{d}{2}}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} - \frac{l}{2}} \right),$$

где  $D$  и  $d$  — наружный и внутренний диаметр катушки,  $l$  — длина волокна.

Значение угла  $\alpha$  выбирается в зависимости от поставленной задачи и обусловленных ею конкретных значений параметров катушки.

**Станок для сложной намотки оптического волокна.** Технологическая реализация ракетной намотки оптического волокна характеризуется рядом сложностей. Например, такой способ невозможно осуществить без связующего материала, поскольку из-за собственной жесткости волокна витки будут сползать и „рассыпаться“. Это связано с особенностью намотки — при формировании ряда от меньшего диаметра катушки к большему каждый последующий виток опирается на предыдущий с заданным натяжением, однако при формировании ряда от большего диаметра катушки к меньшему укладываемый виток будет сползать, так как сил трения недостаточно для его удержания. Для предотвращения этого эффекта и необходимо введение вязкого связующего материала, который должен обеспечивать последующую фиксацию, так как катушка является бескаркасной, т. е. после намотки снимается с оправки и является самостоятельным элементом [7].

Одним из способов обеспечения намотки оптического волокна является контроль укладки, который может производиться с использованием различных методов. Например, в работе [8] описывается станок для намотки оптического волокна, где контроль укладки осуществляется с помощью видеокамеры и сформированное изображение демонстрирует дефекты укладки.

В текстильной промышленности контроль укладки осуществляется рядом методов, которые можно разделить на визуальные и расчетные. Расчетные методы основаны на анализе кинематических соотношений в намоточном оборудовании [9]. Для оптического волокна эти методы не подходят, так как волокно часто „ведет себя“ случайным образом. Визуальные методы бывают инструментальные (контактные) и бесконтактные (анализ изображений) [10, 11]. Контактные методы для оптического волокна недопустимы из-за возможности механического повреждения, а реализация бесконтактных методов связана с рядом сложностей, таких как высокая стоимость, трудность распознавания прозрачного волокна, а также невозможность исправления обнаруженного дефекта. Контроль укладки проводов или углепластика осуществляется по натяжению, однако его значения существенно превышают таковые для оптического волокна [12].

Для осуществления ракетной намотки был разработан макет станка, обладающий следующими особенностями:

— укладка волокна по образующей конуса с большим углом наклона  $\alpha$ ;

- прижим укладываемого оптического волокна для предотвращения сползания витков при некоторых режимах намотки;
- непрерывная подача связующего материала для фиксации витков;
- контроль натяжения укладки волокна.

Модель станка представлена на рис. 3.

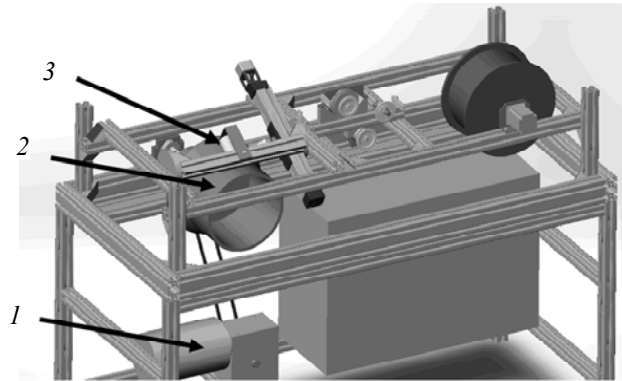


Рис. 3

Принцип работы станка следующий. Асинхронный мотор-редуктор 1 через ремень вращает главный привод с бобиной 2, на которую производится намотка. В месте укладки волокна расположен прижимной силиконовый ролик 3 с возможностью регулировки прижимного усилия. Перемещение укладываемого волокна по образующей конуса осуществляется за счет подвижного поворотного линейного модуля с шариковинтовой передачей и шаговым приводом (рис. 4).

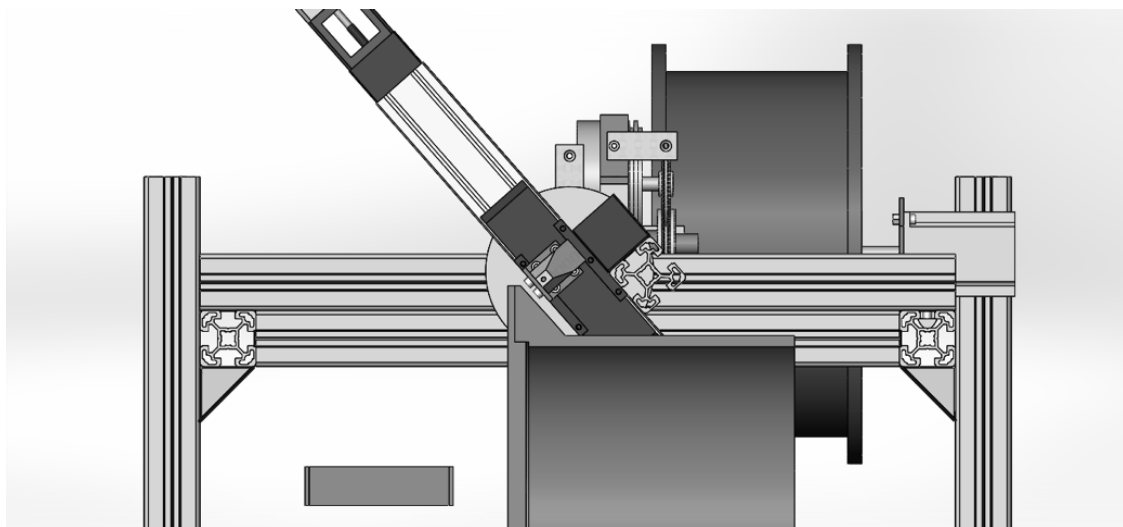


Рис. 4

Как отмечалось выше, для получения бескаркасной катушки с ракетным способом намотки необходимо введение связующего материала в процессе укладки витков. В разработанном станке подача такого материала осуществляется капельным способом на прижимной ролик. Таким образом, ролик равномерно распределяет материал по поверхности ряда.

Важным фактором, обеспечивающим укладку оптического волокна, является натяжение [13—16]. При отсутствии натяжения витки вследствие собственной жесткости волокна будут укладываться случайным образом. Избыточное же натяжение приведет к сползанию витка, а также к подхватыванию ранее уложенных витков, что, в свою очередь, приведет к невозможности дальнейшей намотки.

В разработанном станке для прецизионного контроля натяжения оптического волокна используется система с обратной связью, состоящая из измерительной части — роликов с тензодатчиком — и управляющей части — сервопривода с контроллером.

Элемент измерения натяжения — тензодатчик 1 объединен с энкодером 2, измеряющим длину уложенного волокна; вместе они образуют модуль измерения длины и натяжения (рис. 5), содержащий три ролика — один направляющий и два функциональных. Тензодатчик представляет собой вал, установленный на подшипниках во втулку с чувствительными элементами, он обеспечивает измерение натяжения в диапазоне 0...10 Н. На сервоприводе через муфту устанавливается транспортная катушка с волокном. В процессе намотки система управления получает данные о натяжении и корректирует скорость вращения подающего привода для достижения требуемого значения натяжения.

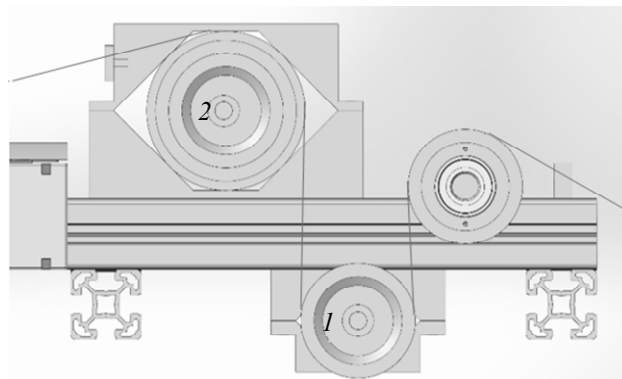


Рис. 5

Таким образом, разработанный станок позволяет формировать ракетную намотку. Благодаря наличию большого количества степеней свободы на станке возможно формирование цилиндрической и конической намотки при использовании соответствующей оправки.

На изготовленном станке была произведена отработка процесса ракетной намотки с использованием волоконно-оптического микрокабеля, с внешним диаметром 1 мм, усиленного кевларом и дополнительной оболочкой. Было изготовлено несколько катушек с максимальной длиной до 1800 м. Образец катушки в процессе намотки показан на рис. 6.



Рис. 6

**Заключение.** Рассмотрены факторы, осложняющие намотку оптического волокна, в частности ракетную, а именно жесткость волокна, чувствительность к механическим воздействиям, стремление к „рассыпанию“ намотанного контура. Для сложной намотки оптического

волокна разработан вариант станка, с помощью которого была произведена экспериментальная намотка. Отличительными особенностями станка являются намотка по образующей конуса с применением прижимного ролика и связующего материала, контроль натяжения и положения укладки волокна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, N 3. P. 553—568. DOI: 10.1007/s11071-014-1317-1.
2. 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, N 3. P. 61—73. DOI: 10.1002/ecja.1084
3. *Optical Fibers, Cables and Systems. International Telecommunication Union Manual*. Geneva, 2009. 324 p.
4. *Волновая оптоэлектроника / Под ред. Т. Тамира*. М.: Мир, 1991. 575 с.
5. 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.
6. Панин А. И. Построение модели зависимости удельной плотности намотки от угла сдвига витков и толщины наматываемого слоя пряжи // *Вестн. ДИТУД (Димитровград. ин-т технологии, управления и дизайна)*. 2001. № 3. С. 12—17.
7. Лопарев В. А., Киселев С. С. Выбор связующего материала для осуществления бескаркасной ракетной намотки волоконно-оптического кабеля // *Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. „Актуальные вопросы в науке и практике“: Сб. статей*. Самара, 2018. С. 149—158.
8. Sharon A., Lin S. Development of an automated fiber optic winding machine for gyroscope production // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 2001. № 17. P. 223—231.
9. Палочкин С. В., Рудовский П. Н., Нуриев М. Н. Методы и средства контроля основных параметров текстильных паковок. М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2006. 225 с.
10. Рудовский П. Н., Киприна Л. Ю., Нуриев М. Н. Методика количественной оценки параметров структуры намотки // *Вестн. Костром. гос. технологического ун-та*. 2004. № 11. С. 27—30.
11. Elgert K. Orientierende tomographische Untersuchungen an Kreuzwickeln // *Melliand Textilber*. 1997. N 9. P. 629—630.
12. Новиков Р. Л. Метод контроля качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа // *Навигация и управление движением: Материалы XV конф. молодых ученых*. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2016. С. 240—245.
13. 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.
14. 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.
15. Мешковский И. К., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 2. С. 47—51.
16. Мешковский И. К., Унтилов А. А., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л. Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 7. С. 76—80.

**Сведения об авторах**

**Вячеслав Александрович Лопарев** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра световодной фотоники; E-mail: viper-sl@hotmail.com

Сергей Степанович Киселев

— канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра световодной фотоники; ст. научный сотрудник; E-mail: kss212@mail.ru

Михаил Михайлович Шилин

— Концерн „Морское подводное оружие — Гидроприбор“; инженер-программист; E-mail: shilin.m.m@mail.ru

Поступила в редакцию  
23.04.18 г.

Ссылка для цитирования: Лопарев В. А., Киселев С. С., Шилин М. М. Особенности станочного оборудования для сложной намотки оптического волокна // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 78—85.

## FEATURES OF MACHINERY EQUIPMENT FOR COMPLEX WINDING OF OPTICAL FIBER

V. A. Loparev<sup>1</sup>, S. S. Kiselev<sup>1</sup>, M. M. Shilin<sup>2</sup><sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: viper-sl@hotmail.com<sup>2</sup>Concern "Sea Underwater Weapon – Gidropribor", 194044, St. Petersburg, Russia

The factors that complicate the winding of fiber-optic cable, in particular rocket fiber, such as fiber stiffness and sensitivity to mechanical stress, are considered. For complex winding of the optical fiber, a variant of the machine is proposed. An experimental winding has been performed using the proposed equipment. Distinctive features of the developed machine are winding along the cone forming with the use of a clamping roller and a binder, control of tension and position of fiber laying. These solutions make it possible to form a frameless contour of a fiber-optic micro cable that is resistant to external mechanical influences.

**Keywords:** winding scheme, fiber-optic communication lines, coil, winding machine

## REFERENCES

1. Kim K.W., Lee J.W., Yoo W.S. *Nonlinear Dynamics*, 2014, no. 3(77), pp. 553–568, DOI: 10.1007/s11071-014-1317-1.
2. Akiyama A., Shibata M., Araki S., Ishii H. *Electronics and Communications in Japan, Part I: Communications*, 2002, no. 3(85), pp. 61–73, DOI: 10.1002/ecja.1084.
3. *Optical Fibers, Cables and Systems*. International Telecommunication Union Manual. Geneva, 2009, 324 p.
4. Tamir Th., ed., *Guided-Wave Optoelectronics*, Springer, 1988, 401 p.
5. Loparev V.A., Kiselev S.S., Shilin M.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, no. 4(17), pp. 612–619, DOI: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-612-619.
6. Panin A.I. *Vestnik Dimitrovgradskogo Instituta Tekhnologii, Upravleniya i Dizayna*, 2001, no. 3(9). (in Russ.)
7. Loparev V.A., Kiselev S.S. *Aktual'nyye voprosy v nauke i praktike* (Topical Issues in Science and Practice), Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Samara, 2018, pp. 149–158. (in Russ.)
8. Sharon A., Lin S. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2001, no. 17, pp. 223–231.
9. Palochkin S.V., Rudovskiy P.N., Nuriyev M.N. *Metody i sredstva kontrolya osnovnykh parametrov tekstil'nykh pakovok* (Methods and Control Devices of Key Parameters of Textile Forgings), Moscow, 2006, 225 p. (in Russ.)
10. Rudovskiy P.N., Kiprina L.Yu., Nuriyev M.N. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2004, no. 11, pp. 27–30. (in Russ.)
11. Elgert K. *Melliand Textilber*, 1997, no. 9, pp. 629–630.
12. Novikov R.L. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* (Navigation and Traffic Control), Proceedings of the XV conference of young scientists, St. Petersburg, 2016, pp. 240–245. (in Russ.)
13. Shramko O.A., Rupasov A.V., Novikov R.L., Aksarin S.M. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1(89), pp. 26–31. (in Russ.)
14. Aksarin S.M., Arkhipov S.V., Varzhel' S.V., Kulikov A.V., Strigalev V.E. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6(88), pp. 22–26. (in Russ.)
15. Meshkovskiy I.K., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2010, no. 2(53), pp. 47–51. (in Russ.)
16. Meshkovskiy I.K., Untilov A.A., Kiselev S.S., Kulikov A.V., Novikov R.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 7(54), pp. 76–80. (in Russ.)

## Data on authors

Vyacheslav A. Loparev

— Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; E-mail: viper-sl@hotmail.com

- Sergey S. Kiselev** — PhD; ITMO University, Department of Light-Guided Photonics; Senior Scientist; E-mail: kss212@mail.ru
- Mikhail M. Shilin** — JSC Concern "Sea Underwater Weapon – Hidropribor"; Engineer-Programmer; E-mail: shilin.m.m@mail.ru

**For citation:** Loparev V. A., Kiselev S. S., Shilin M. M. Features of machinery equipment for complex winding of optical fiber. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 1. P. 78—85 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-78-85