

УДК 681.7.068

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-1-18-27

И.В. Шилова

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗГИБНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА СИЛЫ

Представлена модель взрывобезопасного, помехозащищенного в условиях высокого уровня электромагнитных полей волоконно-оптического датчика силы растяжения на основе волоконно-оптического преобразователя перемещений, отличительной особенностью которого является использование изменения потерь излучения, распространяющегося в чувствительных элементах в виде эллиптически деформируемых кольцевых петель многомодовых волоконных световодов, образующих жгут, что позволяет применять в качестве ис-

точника излучения светодиод, установленный без специального согласующего устройства. Проведен выбор оптимального числа колец чувствительного элемента и выбор пары «источник - приемник излучения» для получения линейной градуировочной характеристики датчика.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик силы, изгибный волоконно-оптический преобразователь перемещения, волоконный световод, физико-математическая модель.

I.V. Shilova

## PHYSICAL-MATHEMATICAL MODEL OF BENDING FIBER-OPTIC SENSOR OF FORCE

There is presented a model of an explosion-proof, jam-resistant under conditions of high level electromagnetic fields fiber-optical sensor of tensile force on the basis of a fiber-optical transformer of movements in which a distinctive peculiarity is an application of loss changes in radiation spreading in sensitive elements as ring loops deformed elliptically of multi-mode fiber light-guides forming a bundle that allows using a diode as a radiation source installed without a special alignment device.

It is defined that a peculiarity of bending fiber-optical transformers of movement of a successive-parallel type is that in separate areas of rings a radius of curvature increases at the expense of deformation and the losses of radiation in these areas decrease, and in

other ones this radius decreases that results in the increase of losses of the radiation spreading by light-guides. Overall losses directed at radiation in light-guides increase linearly with the increase of movement. There is carried out a choice of the optimum number of rings of a sensitive element and a choice of “source-radiation receiver” for obtaining a linear calibration characteristic of the sensor. It is shown that varying the number of coils in the bending fiber-optical transformer it is possible to change a range of movements measured in a form of calibration characteristic of a transformer.

**Key words:** fiber-optic sensor of force, bending fiber-optic transformer of movement, fiber light-guide, physical-mathematical.

### Введение

Высокий уровень электромагнитных полей в промышленном силовом оборудовании (например, в машиностроении или энергетике) создает помехи и наводки в традиционных датчиках силы с электрическим выходным сигналом. Это затрудняет их практическое применение. В таком случае наиболее оптимально технически и экономически целесообразно решать задачи измерения механических величин (перемещения, давления, силы) путем конструирования волоконно-оптических датчиков (ВОД). Они имеют ряд преимуществ

по сравнению с традиционными электрическими датчиками [1-3]:

- могут использоваться во взрывоопасной среде ввиду их абсолютной взрыво- и искробезопасности;

- имеют небольшие габариты и вес, высокую механическую прочность, простую конструкцию, а значит, повышенную надежность;

- изготавливаются из диэлектрических материалов, следовательно, обеспечивают электробезопасность;

- химически инертны;

- устойчивы к вибрациям, механическим ударам, повышенным и пониженным температурам;
- потребляют небольшое количество энергии;
- позволяют производить бесконтактные и дистанционные измерения.

При использовании волоконных световодов в различных волоконно-оптических датчиках возникает задача ввода излучения в световод и проблема расшифровки сигнала. В датчиках, построенных на основе моноволоконных световодов, используются, как правило, только лазеры в качестве источника излучения, потому что только их излучение можно с высокой эффективностью ввести в моноволоконный световод, диаметр световодящей сердцевины которого составляет 5-50 мкм. Для этого требуется специальное согласующее устройство, что усложняет конструкцию датчика [4; 5].

Существуют фазовые волоконно-оптические датчики силы [6; 7] и датчики силы на основе решеток Брэгга [8; 9], но они требуют сложной расшифровки сигнала.

В связи с этим актуальной является задача разработки волоконно-оптических датчиков, для которых не требуется сложное согласующее устройство при вводе излучения в световод, с простой расшифровкой сигнала и небольшой стоимостью.

В представленной работе предлагается применение многоэлементных конструкций волоконно-оптических датчиков, у которых волоконные световоды используются в качестве чувствительных элементов. Условно их можно разделить на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

Последовательные многоэлементные датчики содержат один волоконно-оптический чувствительный элемент (моносветовод), который взаимодействует с измеряемым физическим полем на большом участке длины световода, либо несколько чувствительных элементов, расположенных подряд на одном световоде. Параллельные многоэлементные датчики содержат большое количество волоконных моносветоводов, которые все одновремен-

но испытывают локальное воздействие измеряемой физической величины. Последовательно-параллельные многоэлементные волоконно-оптические датчики представляют собой комбинацию двух первых.

Многоэлементность конструкции чувствительных элементов таких датчиков позволяет усреднить воздействие измеряемой физической величины и получить одновременно интегральный оптический сигнал от всех участков чувствительных элементов, что должно улучшить стабильность чувствительности датчиков. Для параллельных датчиков входные и выходные участки волоконно-чувствительных элементов можно изготовить в виде волоконно-оптического жгута, что позволит применить в качестве источника излучения светодиоды. С другой стороны, в настоящее время разработаны и выпускаются массовыми тиражами различные типы светодиодов, которые обладают, по сравнению с лазерами, более стабильными временными и спектральными характеристиками, поэтому представляет интерес применение их в качестве источников излучения в волоконно-оптических датчиках. Ввиду условий высокой расходимости излучения светодиодов их удобно использовать в качестве источников излучения с применением волоконно-оптических жгутов как чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков, так как это снимает проблему ввода светового излучения в волоконные световоды от источников как направленного, так и ненаправленного действия [10]. Волоконно-оптические жгуты состоят из стеклянных световодов без упрочняющей полимерной оболочки, поэтому в датчиках они используются только для передачи света или изображения, так как механическое воздействие на отдельный стеклянный световод жгута приводит к трещинам и разрывам в нём.

Ряд вопросов, связанных с повышением стабильности характеристик, реализации высокой чувствительности волоконно-оптических датчиков к измеряемым параметрам, изучен недостаточно. Это касается вопросов применения волоконно-оптических жгутов как многоэлементных первичных преобразователей различных

физических величин, а также вопросов использования для возбуждения световодов источников излучения с большой угловой расходимостью.

Волоконные световоды находят широкое применение в качестве чувствительных элементов микроизгибных волоконно-оптических датчиков [1-5], при работе которых происходит многократный изгиб световодов с малыми радиусами кривизны, что приводит к возникновению микротрещин в кварцевой сердцевине и оболочке

световодов, а также нарушению целостности защитной полимерной оболочки, вследствие чего ускоряется выход из строя таких элементов. Поэтому важной научно-технической задачей является поиск физических и технических решений построения изгибных волоконно-оптических датчиков, чувствительные элементы которых работают при больших радиусах кривизны изгиба световодов, а датчики по чувствительности сравнимы с микроизгибными.

### Физическое моделирование оптической части датчика

Для измерения силы растяжения в условиях высокого уровня электромагнитных полей, во взрыво- и пожароопасных условиях разработан многоэлементный волоконно-оптический датчик силы (МВОДС) с вольтовым выходным сигналом для дистанционного измерения силы растяжения на основе волоконно-оптического преобразователя перемещения изгибного типа. Работа преобразователя перемещения основана на чувствительных элементах в виде эллиптически деформируемых под воздействием измеряе-

мых перемещений кольцевых петель кварцевых многомодовых волоконных световодов (рис. 1).

При этом в волоконном световоде кривизна витков изменяется, что приводит к уменьшению выходного сигнала вследствие выхода энергии мод высших порядков в защитную полимерную оболочку. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер, в качестве приемника излучения - ваттметр оптический ОМЗ-65.

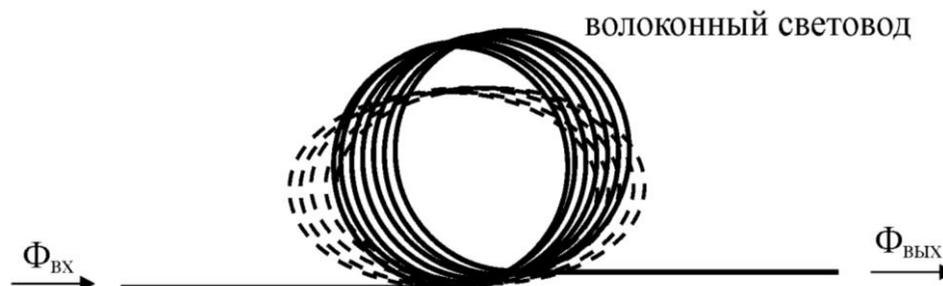


Рис. 1. Чувствительный элемент волоконно-оптического преобразователя перемещений последовательного типа

С целью оптимального выбора количества витков в многоэлементном деформируемом изгибном кольцевом преобразователе перемещений были проведены измерения для построения градуировочной характеристики преобразователя последовательного типа (на основе одного волоконного световода) с различным числом витков. Перемещение проводилось путем растяжения витков световода таким образом, чтобы окружность преобразовалась в эллипс. В экспериментах использовались

преобразователи с одним, двумя, пятью, десятью и двадцатью кольцами волоконного световода.

На рис. 2 приведены зависимости выходного сигнала преобразователя последовательного типа от величины перемещения при использовании различного числа витков световода диаметром 10 мм.

Из приведенных на рис. 2 зависимостей видно, что механизм увеличения потерь превалирует над механизмом их уменьшения для любого числа витков де-

формируемого преобразователя, поэтому такой преобразователь можно использовать для построения волоконно-оптических датчиков.

Из рис. 2 также видно, что, варьируя число витков в преобразователе перемещений, можно изменять диапазон измеряемых перемещений и форму градуировоч-

ной характеристики преобразователя. Наиболее близкая к линейной зависимость наблюдается для преобразователя с 10 и 20 витками. По конструктивным соображениям, в целях минимизации габаритных размеров датчика, было выбрано использование 10 витков на каждом волоконном световоде.

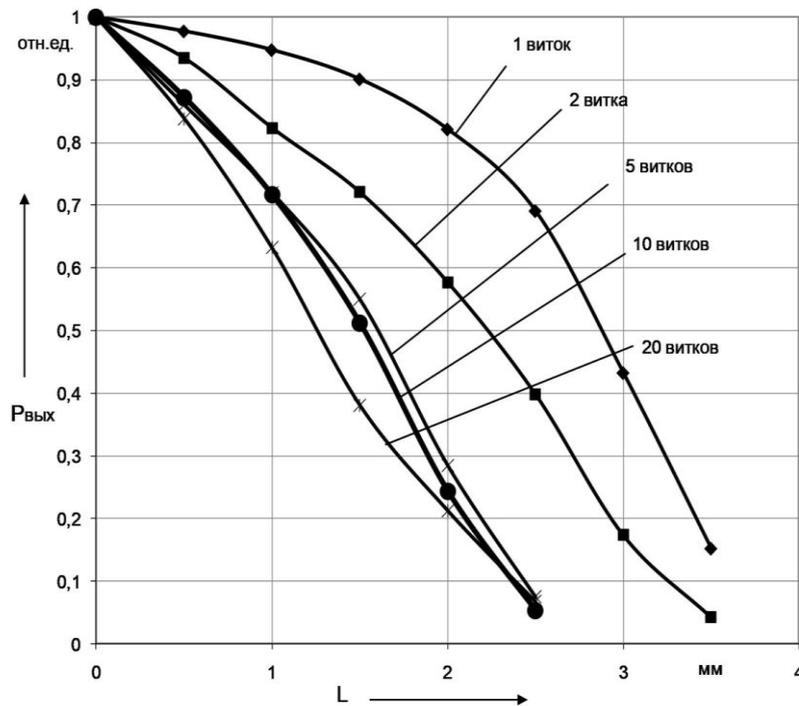


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала изгибного преобразователя перемещений последовательного типа

Как было отмечено выше, при применении волоконно-оптического преобразователя последовательного типа в виде одного волоконного световода с несколькими витками можно использовать только лазер в качестве источника излучения и требуется юстирующее устройство для ввода излучения в световод. Для устранения этих недостатков в качестве чувствительного элемента датчика была разработана световедущая часть последовательно-параллельного типа (рис. 3), состоящая из 10-16 отрезков стандартного многомодового волоконного световода (диаметр сердцевины 50 мкм, диаметр кварцевой оболочки 125 мкм, диаметр наружной полимерной оболочки 250 мкм), каждый из которых содержит по 10 круглых колец диаметром 10 мм, склеенных между собой. Такая световедущая часть позволяет ис-

пользовать светодиоды в качестве источников излучения и оптимизирует конструкцию по габаритам и стоимости. В предлагаемой конструкции волоконные световоды собраны на концах светопередающей части в виде жгута, что позволяет ввести излучение светодиода в волоконные световоды без специального согласующего устройства (простой пристыжкой). Кроме того, применение жгута из световодов позволяет усреднить сигналы и получить интегральную характеристику воздействующей силы. Необходимо отметить, что полимерная оболочка световодов играет важную роль в конструкции, так как придает эластичность световодам и предотвращает возникновение в них трещин при изгибах до радиусов порядка 2 мм.

С целью оптимизации градуировочной характеристики датчика путем оптимального выбора источника излучения (ИИ) для возбуждения световодов и приёмника излучения (ПИ) проведены исследования изменения сигнала датчика в зависимости от величины перемещения (величины растяжения колец). В качестве источника излучения в экспериментах использовались светодиоды, излучающие в

различных спектральных областях, которые непосредственно (без всяких согласующих устройств) приставлялись к входному торцу волоконно-оптического жгута, а в качестве фотоприёмника применялись кремниевые фотодиоды ФД-256, ФД-265А. Зависимость выходного сигнала разработанного преобразователя перемещений при использовании различных источников и приемников излучения приведена на рис. 4.

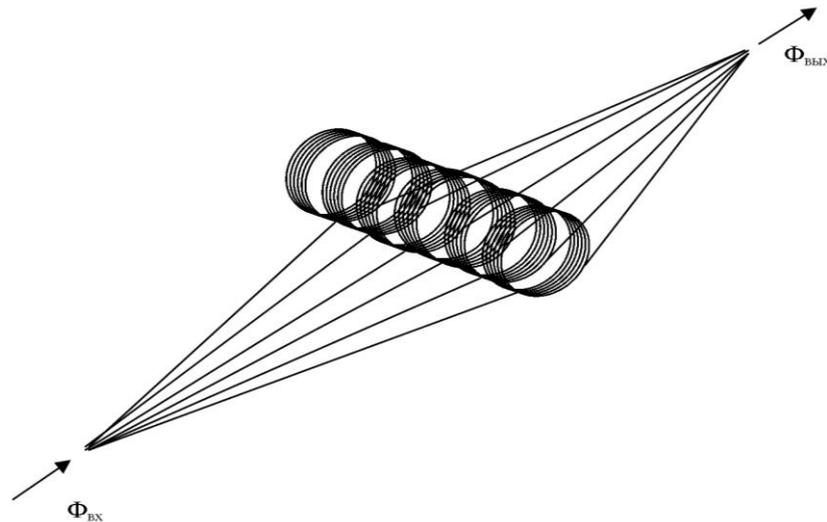


Рис. 3. Световедущая часть последовательно-параллельного типа (чувствительный элемент волоконно-оптического преобразователя перемещения для датчика силы)

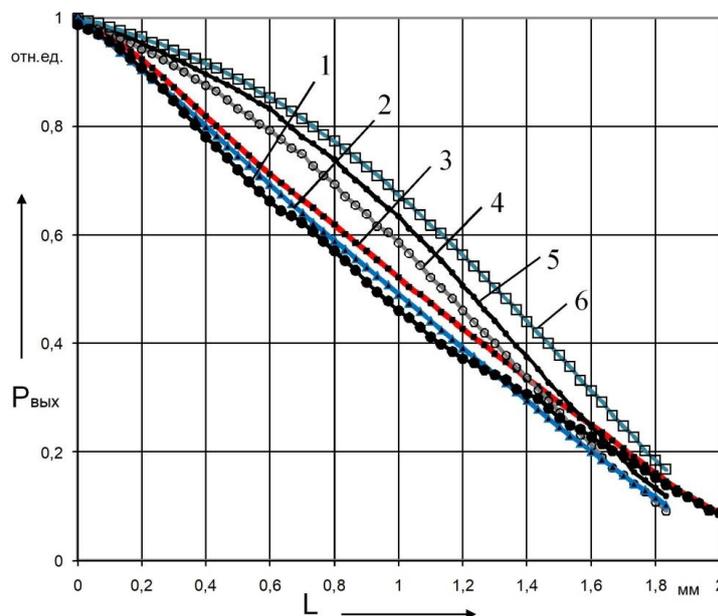


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала преобразователя перемещений датчика силы от величины перемещения (растяжения колец световода)  $L$  при использовании различных источников и приемников излучения:  
 1 - ИИ - светодиод  $\lambda = 938 \dots 968$  нм, ПИ - ФД-256; 2 - ИИ - светодиод  $\lambda = 470 \dots 480$  нм, ПИ - ФД-256; 3 - ИИ - светодиод  $\lambda = 630 \dots 640$  нм, ПИ - ФД-256;  
 4 - ИИ - светодиод белого света, ПИ - ФД-256; 5 - ИИ - ИК светодиод, ПИ - ФД-265А;  
 6 - ИИ - светодиод белого света, ПИ - ФД-265А

Из приведенных на рис. 4 зависимостей выходного сигнала от перемещения видно, что наибольшую линейность имеют графики для датчика со светодиодами в качестве источников излучения, излучающими с длинами волн  $\lambda = 470 \dots 480$  нм и  $\lambda = 630 \dots 640$  нм, и ФД-256 в качестве приёмника излучения. Причем светодиод с

длиной волны  $\lambda = 630 \dots 640$  нм имеет лучшее спектральное согласование с фотодиодом ФД-256, поэтому эта пара и использовалась при разработке датчика силы. Зависимость выходного сигнала разработанного преобразователя перемещений приведена на рис. 5.

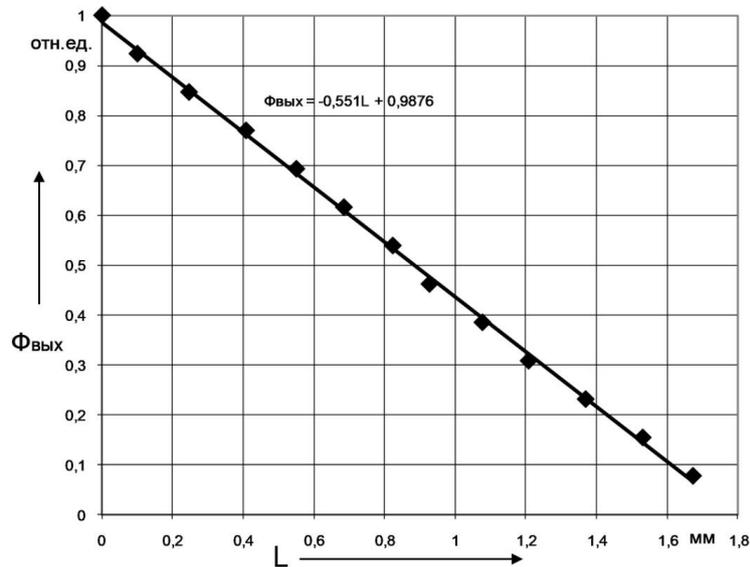


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала многоэлементного волоконно-оптического преобразователя перемещения от величины растяжения  $L$  витков волоконных световодов

Эксперимент показал, что особенностью изгибных волоконно-оптических преобразователей перемещения последовательно-параллельного типа является то, что на отдельных участках колец радиус кривизны увеличивается за счет деформации и потери излучения на этих участках уменьшаются, а на других этот радиус уменьшается, что приводит к увеличению потерь излучения, распространяющегося по световодам. Общие наводимые потери на излучение в световодах линейно возрастают с увеличением перемещения.

Из приведенной зависимости видно, что она носит линейный характер; при деформации витков световода от нуля до 1,7 мм наблюдается изменение сигнала от максимального до уровня 0,05 от максимального значения, что свидетельствует о высоком уровне реализуемой чувствитель-

ности к перемещению, высокому динамическому диапазону измеряемой величины и линейности сигнала.

При аппроксимации полученных данных зависимость оптического сигнала  $P_{\text{ВЫХ}}$  от растяжения колец волоконных световодов имеет вид

$$P_{\text{ВЫХ}} = P_0(1 - kL), \quad (1)$$

где  $P_0$  - максимальная мощность сигнала на выходе оптической части;  $k$  - коэффициент пропорциональности, учитывающий уменьшение сигнала вследствие выхода части излучения из волоконных световодов при изменении их радиуса изгиба при растяжении колец световодов (подбирается экспериментально);  $L$  - перемещение (растяжение колец волоконных световодов).

### Разработка механической части датчика и ее математическое моделирование

Конструкция первичного преобразователя волоконно-оптического датчика си-

лы растяжения (рис. 6) содержит крепежный цилиндр 1, который прикрепляется к

неподвижной опоре, и растягивающий цилиндр 2, прикрепляемый к объекту контроля, превращающий кольца световедущей части 3 в эллипс. Между крепежным и растягивающим цилиндрами крепится калиброванная пружина 4 с коэффициентом упругости  $K_{упр}$  для увеличения диапазона измеряемых сил.

Перемещение (растяжение колец волоконных световодов)  $L$  связано с воздействующей силой формулой

$$F = (K_{упр1} + K_{упр2})L, \quad (2)$$

где  $F$  - воздействующая сила, Н;  $K_{упр1}$  - коэффициент упругости пружины;  $K_{упр2}$  - коэффициент упругости колец волоконных световодов.

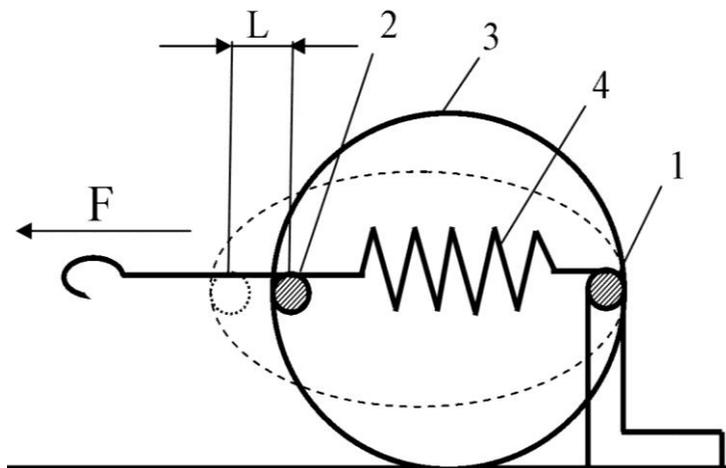


Рис. 6. Эскиз датчика силы растяжения

Используя пружины 4 с различными коэффициентами упругости, можно изменять диапазон измеряемых сил. Также для

варьирования этого диапазона можно установить пружину между растягивающим цилиндром 2 и объектом контроля.

### Разработка электрической части датчика

Была разработана электрическая принципиальная схема датчика МВОДС, представленная на рис. 7. Фотодиоды VD1 и VD2 включены в фотогальваническом режиме (поскольку входные потоки излучения небольшие), поэтому входной сигнал является сигналом напряжения. Источником излучения служит светодиод HL1. Сигнал с измерительного канала поступает на усилитель DA1, с опорного - на усилитель DA2. Затем оба сигнала поступают на дифференциальный усилитель DA3. Таким образом, показания датчика не зависят от изменения характеристик светодиода HL1 с течением времени. После этого сигнал инвертируется, так как изначально самое большое значение сигнала

соответствует перемещению, равному нулю. Резистор R9 служит для установки нуля датчика, резистор R13 на усилителе DA4 - для калибровки датчика. Выходной сигнал МВОДС является вольтовым.

Зависимость выходного сигнала  $U$  (В) от выходного оптического сигнала имеет вид

$$U = S_e K_y P_0 (1 - P_{\text{вых.отн}}), \quad (3)$$

где  $S_e$  - интегральная чувствительность фотоприёмника, В/Вт;  $K_y$  - коэффициент усиления;  $P_0$  - максимальная мощность сигнала на выходе оптической части, Вт;  $P_{\text{вых.отн}}$  - относительная мощность сигнала на выходе оптической части, зависящая от воздействующего перемещения.

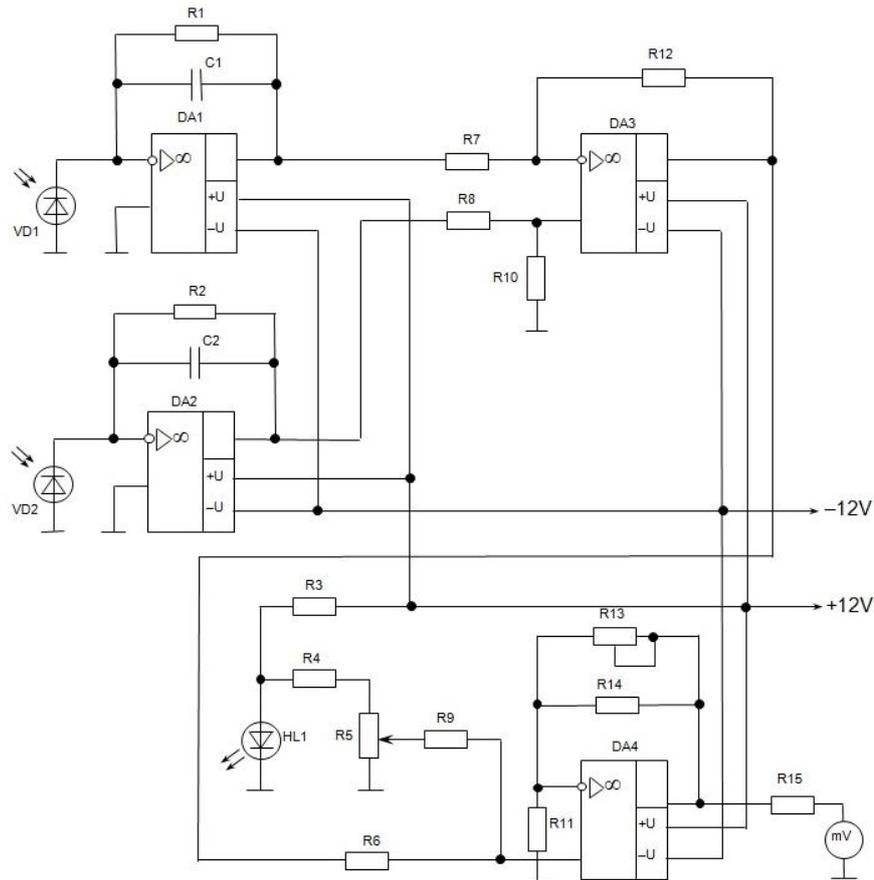


Рис. 7. Схема электрическая принципиальная МВОДС

Совокупность формул (1), (2), (3) и экспериментально полученных зависимостей (рис. 2, 4, 5) представляет собой физико-математическую модель многоэле-

ментного волоконно-оптического датчика силы и позволяет спрогнозировать его градуировочную характеристику, представленную на рис. 8.

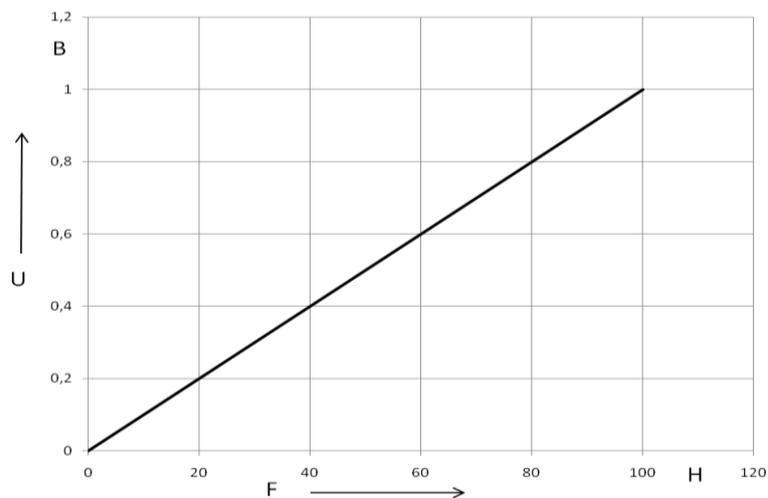


Рис. 8. Градуировочная характеристика волоконно-оптического датчика силы растяжения

диапазон измеряемых сил 0...100 Н представлен для примера, так как этот диапазон может варьироваться в зависи-

мости от коэффициента упругости пружины 4.

### Заключение

В работе показано, что, варьируя число витков в изгибном волоконно-оптическом преобразователе перемещений, можно изменять диапазон измеряемых перемещений и форму градуировочной характеристики преобразователя. Показано, что особенностью изгибных волоконно-оптических преобразователей перемещения последовательно-параллельного типа является то, что на отдельных участках колец радиус кривизны увеличивается за счет деформации и потери излучения на этих участках уменьшаются, а на других этот радиус уменьшается, что приводит к увеличению потерь излучения, распро-

страняющегося по световодам. Общие наводимые потери на излучение в световодах линейно возрастают с увеличением перемещения. Установлено, что путем подбора пары «источник - приемник излучения» можно добиться получения линейной градуировочной характеристики датчика. Предложена модель датчика силы растяжения на основе волоконно-оптического изгибного преобразователя перемещений, являющегося взрывобезопасным, помехозащищенным в условиях высокого уровня электромагнитных полей, имеющего простую конструкцию и невысокую стоимость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optical Fiber Sensors. Advanced Techniques and Applications / edited by Ginu Rayan. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 564 p.
2. Ignacio R. Matias, Satoshi Ikezawa, Jesus Corres. Fiber Optic Sensors. Current Status and Future Possibilities. Springer, 2017. 379 p. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9.
3. William B. Spillman, Eric Udd. Field Guide to Fiber Optic Sensors. Bellingham, Washington, USA: SPIE PRESS, 2014. 136 p.
4. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
5. Буймистряк Г.Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем. СПб., 2005. 191 с.
6. Gong Y. [at al.] Highly sensitive force sensor based on optical microfiber asymmetrical Fabry-Perot interferometer // OPTICS EXPRESS. 2014. Vol. 22, № 3. P. 3578-3584. DOI: 10.1364/OE.22.003578.
7. Villatoro J., Minkovich V.P., Zubia J. Lateral Force Sensor Based on a Photonic Crystal Fiber Mode Interferometer // International science conference "Optical Sensors 2014". Barcelona, Spain: Advanced Photonics, 2014. DOI: 10.1364/SENSORS.2014.SeW3C.4.
8. Ge J. [at al.] Spiral-structured fiber Bragg grating for contact force sensing through direct power measurement // OPTICS EXPRESS. 2014. Vol. 22, № 9. P. 10439-10445. DOI: 10.1364/OE.22.010439.
9. Liu Y., Kin Seng Chiang, Pak Lim Chu Fiber-Bragg-grating force sensor based on a wavelength-switching actively mode-locked erbium-doped fiber laser // APPLIED OPTICS. 2005. Vol. 44, № 23. P. 4822-4830. DOI: 10.1364/AO.44.004822.
10. Сергеев С.С., Марков А.П., Коннов В.В. Волоконно-оптические системы технологического контроля динамических объектов. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. 193 с.
1. Optical Fiber Sensors. Advanced Techniques and Applications / edited by Ginu Rayan. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 564 p.
2. Ignacio R. Matias, Satoshi Ikezawa, Jesus Corres. Fiber Optic Sensors. Current Status and Future Possibilities. Springer, 2017. 379 p. DOI: 10.1007/978-3-319-42625-9.
3. William B. Spillman, Eric Udd. Field Guide to Fiber Optic Sensors. Bellingham, Washington, USA: SPIE PRESS, 2014. 136 p.
4. Freiden J. *Modern Sensors: reference book*. М.: Technosphere, 2005. pp. 592.
5. Buimistryuk G.Ya. *Information-Measuring Engineering and Technology Based on Fiber-Optical Sensors and Systems*. S-Pb., 2005. pp. 191.
6. Gong Y. [at al.] Highly sensitive force sensor based on optical microfiber asymmetrical Fabry-Perot interferometer // OPTICS EXPRESS. 2014. Vol. 22, № 3. P. 3578-3584. DOI: 10.1364/OE.22.003578.
7. Villatoro J., Minkovich V.P., Zubia J. Lateral Force Sensor Based on a Photonic Crystal Fiber Mode Interferometer // International science conference "Optical Sensors 2014". Barcelona, Spain: Advanced Photonics, 2014. DOI: 10.1364/SENSORS.2014.SeW3C.4.
8. Ge J. [at al.] Spiral-structured fiber Bragg grating for contact force sensing through direct power measurement // OPTICS EXPRESS. 2014. Vol. 22, № 9. P. 10439-10445. DOI: 10.1364/OE.22.010439.
9. Liu Y., Kin Seng Chiang, Pak Lim Chu Fiber-Bragg-grating force sensor based on a wavelength-switching actively mode-locked erbium-doped fiber laser // APPLIED OPTICS. 2005. Vol. 44, № 23. P. 4822-4830. DOI: 10.1364/AO.44.004822.

10. Sergeev S.S., Markov A.P., Konnov V.V. *Fiber-Optical Systems of Technological Control of Dy-*

*namic Objects*. Mogilyov: Beloruss-Russ. Uni., 2007. pp. 193.

*Ссылка для цитирования:*

*Шилова И.В. Физико-математическая модель изгибного волоконно-оптического датчика силы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 18–27. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-1-18-27.*

*Статья поступила в редакцию 16.11.19.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева*

*Подмастерьев К.В.,*

*член редсовета журнала «Вестник БГТУ».*

*Статья принята к публикации 09. 01. 20.*

#### **Сведения об авторах:**

**Шилова Ирина Владимировна**, к.т.н., доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Белорусско-Российского университета, e-mail: irina.schilova@tut.by.

**Shilova Irina Vladimirovna**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Life Safety”, Belorussian-Russian University, e-mail: irina.schilova@tut.by.