

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

УДК 681.785.64

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ, МОДЕЛИ И КОНСТРУКЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА¹

Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, Т. Ю. Бростилова

PRINCIPLE OF CONSTRUCTION, MODEL AND DESIGN OF FIBER AND OPTICAL SENSORS OF PRESSURE OF REFLECTIVE TYPE

E. A. Badeeva, T. I. Murashkina, T. Y. Brostilova

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современное развитие отраслей народного хозяйства требует внедрения новых подходов и безопасных технологий при измерении различных физических величин, в том числе на основе волоконно-оптического принципа действия. Так как давление многообразных сред находится на одном из первых мест среди величин, подлежащих измерению на изделиях многих отраслей, то и целью настоящего исследования является создание новых конструктивных исполнений волоконно-оптических датчиков давления (ВОДД), отвечающих современным требованиям заказчиков. *Материалы и методы.* Для повышения надежности и точности волоконно-оптических датчиков давления предлагается применение открытых оптических каналов измерительных преобразователей. С целью унификации конструктивных решений волоконно-оптических измерительных преобразователей отражательного типа используется явление отражения. *Результаты.* Предложены новые принципы построения, структурные модели и конструкции ВОДД отражательного типа, отличительными особенностями которых являются простота, надежность и унификация конструкции, высокая точность измерения за счет исключения изгибов волоконно-оптического кабеля, введения дополнительного измерительного канала, реализации дифференциального управления сигналами. *Выводы.* Разработанные технические решения волоконно-оптических датчиков давления позволяют обеспечить безопасное, точное и надежное измерение давления в разных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик давления, принцип действия, открытый оптический канал, структурная схема, конструкция, отражение.

Abstract. *Background.* Modern development of branches of the national economy demands introduction of new approaches and safe technologies at measurement of various physical quantities, including on the basis of the fiber-optical principle of action. As pressure of diverse environments is on one of the first places among other physical quantities which measurement needs to be provided on products of many branches, and the purpose of the real research is creation of new designs of the fiber-optical sensors of pressure meeting the modern requirements of customers. *Materials and methods.* For increase in reliability and accuracy of measurement of fiber-optical sensors of pressure use of open optical chan-

¹ Работа выполнена в рамках Госзадания 8.11785.2018/11.12.

nels of measuring converters is offered. For the purpose of standardization of constructive solutions of fiber-optical measuring converters of reflective type the phenomena of reflection, interruption and refraction are used. *Results.* The new principles of construction, structural models and designs of fiber-optical sensors of pressure of reflective type which distinctive feature is simplicity, reliability and unification of a design, high precision of measurement at the expense of an exception of bends of a fiber-optical cable, introduction of the additional measuring channel, realization of differential management of signals are offered. *Conclusions.* The developed technical solutions of fiber-optical sensors of pressure will allow to provide safe, exact and reliable measurement of pressure in different service conditions.

Key words: pressure optical fiber sensor, principle of action, open optical link, skeleton diagram, construction, reflection.

Введение

Современное развитие космической, авиационной, нефтедобывающей, химической промышленности, приборостроения, медицины и других отраслей народного хозяйства требует внедрения инновационных подходов и безопасных технологий при измерении физических величин. К таким средствам измерения относятся датчики с использованием волоконно-оптического принципа действия. Давление, исходя из анализа технических заданий российских предприятий и учреждений, находится на одном из первых мест среди физических величин, измерение которых необходимо обеспечить на различных изделиях [1]. В последнее время многие потребители датчиков давления сориентировались на применении ВОДД на брегговских решетках, упуская из виду их низкую надежность в жестких условиях эксплуатации. Хорошей альтернативой «брегговским» ВОДД могут стать ВОДД с открытым оптическим каналом (ООК) [2], которые в последние годы успешно разрабатываются в НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета для изделий, эксплуатируемых в жестких условиях эксплуатации.

Целью настоящего исследования является создание новых структурных моделей и конструктивных исполнений волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом, отвечающих современным требованиям заказчиков.

Принципы построения и структурные модели волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа

Универсальными принципами действия измерительных преобразователей, ключевых рабочих элементов волоконно-оптических датчиков давления и наиболее простыми при технической реализации – это явления отражения света [3]. Основу разрабатываемых измерительных преобразователей ВОДД составляет ООК. В зоне измерения волоконно-оптического преобразователя с ООК происходит изменение интенсивности излучения светового потока, проходящего с выхода торца подводящего оптического волокна (ПОВ) на вход торца отводящего оптического волокна (ООВ), при этом отсутствуют изгибы волоконно-оптического кабеля (ВОК), что обеспечивает повышенную надежность датчика.

Эффективность управления световым потоком в ООК оценивается по таким критериям, как глубина модуляции оптического излучения; диапазон вносимого затухания; чувствительность преобразования оптического излучения; значения потерь светового потока; линейность функции преобразования;

устойчивость параметров к внешним воздействиям; технологичность конструкции и изготовления и т.п. [3]. Обеспечение заданных критериев в волоконно-оптических преобразователях реализуется за счет введения в конструкцию в качестве чувствительного элемента зеркальных поверхностей, предназначенных для введения в ООК допустимого затухания оптического сигнала в функции давления, подлежащего измерению.

На рис. 1 и 2 приведены структурные схемы ВОДД отражательного типа. В первом случае в конструкцию датчика для снижения дополнительных погрешностей различной природы введен компенсационный канал, а во втором – применяются два измерительных канала (Р – рабочий, К – компенсационный), один из которых реализован на базе волоконно-оптических преобразователей линейных (ВОПЛМП) и угловых (ВОПУМП) микроперемещений [4–7].

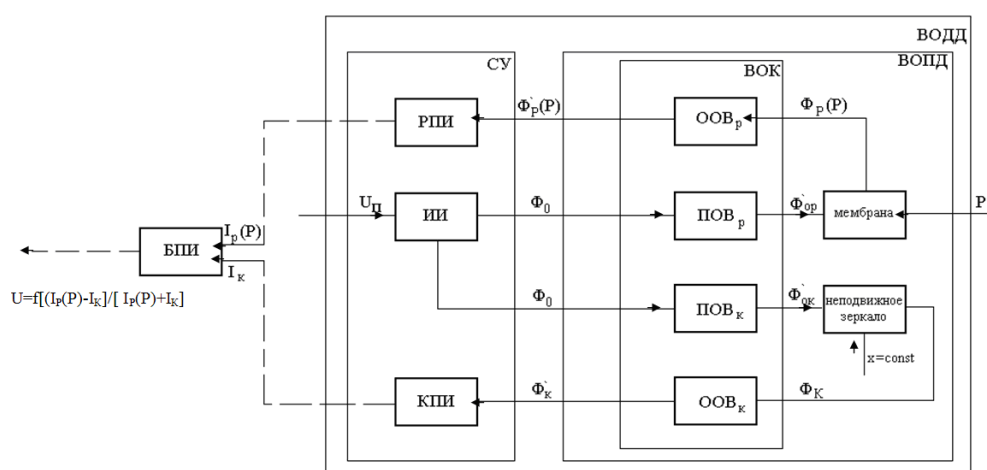


Рис. 1. Схематическое изображение ВОДД отражательного типа, включающего компенсационный канал

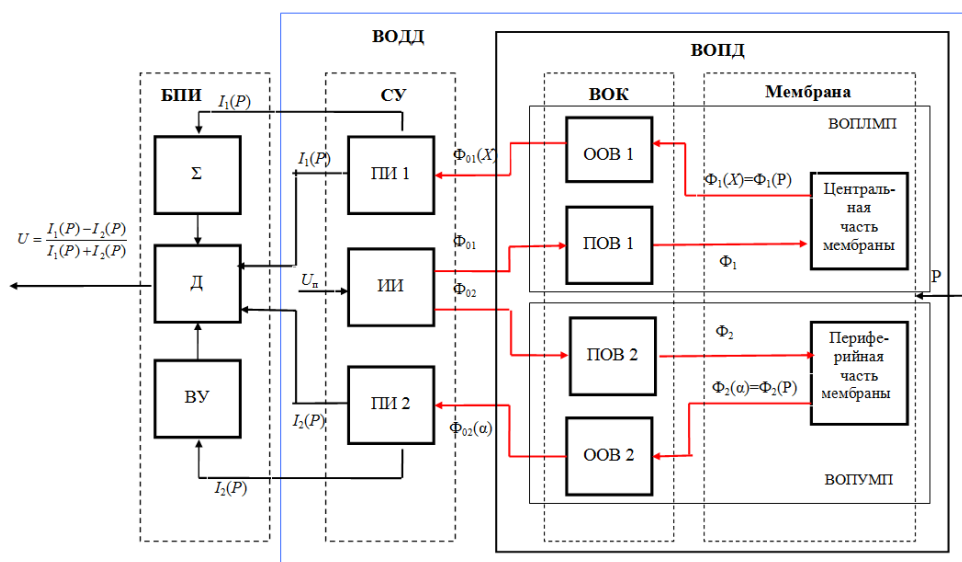


Рис. 2. Структурная схема квазидифференциального ВОДД отражательного типа

В наиболее общем случае ВОДД отражательного типа содержат волоконно-оптический преобразователь давления ВОПД, согласующее устройство СУ (в составе которого источник излучения ИИ и приемники излучения ПИ двух измерительных каналов), волоконно-оптический кабель ВОК (состоящего из подводящих ПОВ и отводящих ООВ оптических волокон). ВОДД присоединяется к блоку преобразования информации (БПИ). В ВОДД с ООК принято использовать в качестве упругого элемента простую в конструктивном исполнении плоскую мембрану, которая на достаточном уровне восстанавливает свое начальное состояние после снятия действия измеряемого давления.

На рис. 2 в состав БПИ входит сумматор Σ , делитель Д и вычитающее устройство ВУ.

В соответствии с рассмотренными структурными схемами разработаны новые конструкции ВОДД отражательного типа.

Конструктивное исполнение волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа

На рис. 3 приведен общий вид конструкции датчика, содержащий компенсационный канал [4]. Корпус 1 датчика давления отражательного типа изготовлен из материала 36НХТЮ-Ш и выполнен в виде стакана, дно которого со стороны торца кабеля ВОК отполировано до зеркальной поверхности, исполняющей роль мембраны – чувствительного элемента (ЧЭ). На другой стороне корпуса выполнена резьба для крепления датчика в месте измерения давления. К корпусу сваркой устанавливается втулка 2 из материала 36НХТЮ-Ш. Втулка выполняет роль фиксатора наконечника 3, выполненного из стали 29НХ. Подводящие и отводящие рабочие оптические волокна 5 общего торца ВОК вклеиваются по центру данного наконечника. Наконечник имеет глухое отверстие, в которое устанавливается неподвижное зеркало 6 и напротив него соответственно располагаются оптические волокна компенсационного канала 7.

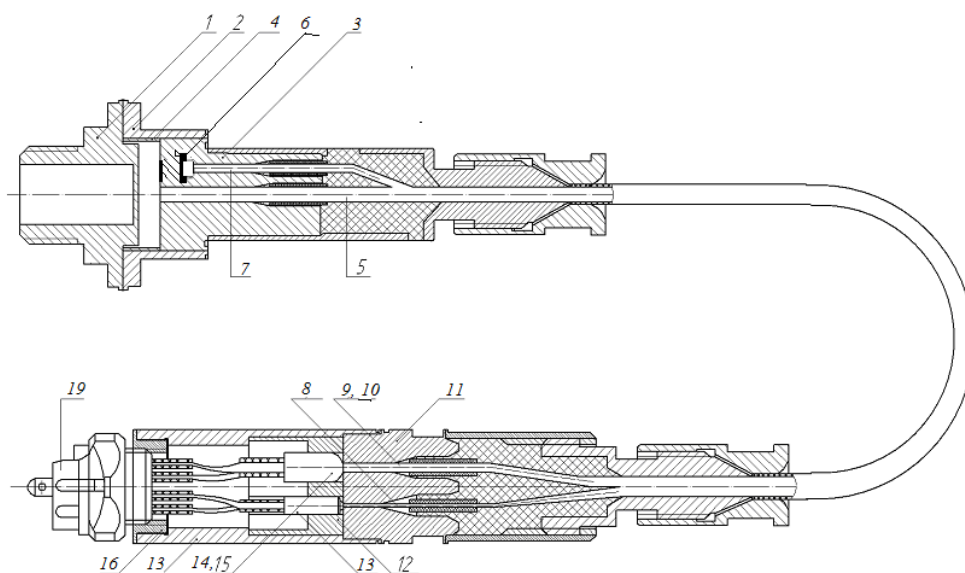


Рис. 3. ВОДД отражательного типа с компенсационным каналом. Общий вид

За счет прокладки 4 из сплава 29НК переменной толщины задается требуемый зазор между корпусом датчика давления и наконечником [6]. Если используются оптические волокна с диаметром сердцевины 200 мкм и апертурой 0,2, то зазор должен быть 0,7...1,2 мм для обеспечения высокой чувствительности преобразования оптической системы датчика и линейной функции преобразования датчика.

Полость изготовленного датчика заполняется инертным газом – аргоном – для исключения выпадения конденсата или росы на его внутренних поверхностях. Данная процедура способствует снижению возникающей дополнительной погрешности датчика при изменении температуры окружающей среды.

Противоположные концы оптических рабочих подводящих и отводящих волокон и компенсационных 8, 9 и 10, соответственно, вклеиваются в наконечник 11 волоконно-оптического кабеля, выполненного из стали 12Х18Н10Т. Наконечник одновременно является конструктивным элементом СУ из стали 29НК.

К наконечнику пристыковывается фотоблок 12 с вклеенными ИК-светодиодом 13, рабочим и компенсационным фотодиодами 14 и 15, соответственно. С другой стороны наконечника крепится кожух 16, в который по резьбе вворачивается розетка 19 типа СНЦ 13-10/10Р-11-В, к контактам которой подпаиваются выводы светодиода и фотодиодов. Данную сборку необходимо залить клеем ВК-9 с двуокисью циркония. С помощью согласующего устройства датчик присоединяется с блоком преобразования информации БПИ с помощью розетки 19.

Принцип действия датчика следующий.

Излучаемый светодиодом 14 световой поток по подводящему оптическому волокну 9 направляется в зону измерения – в сторону зеркальной поверхности мембраны, которая прогибается под действием измеряемого давления среды. Изменяется интенсивность светового потока, отраженного от мембраны, поступающего в приемные торцы отводящих оптических волокон ООВ 10. С выхода данного волокна световой поток поступает на светочувствительную площадку фотодиода 16, где преобразуется в электрический сигнал, поступающий впоследствии на вход блока преобразования информации БПИ.

Часть светового потока светодиода 14 по оптическим волокнам 10 компенсационного канала направляется на неподвижное зеркало 6 для компенсации изменения мощности излучения светодиода 14 и неинформативных потерь светового потока при изгибах кабеля. Отразившись, световой поток от неподвижного зеркала 6 по отводящим ОВ попадает на компенсационный приемник излучения ПИ 15, где преобразуется в электрический компенсационный сигнал, поступающий также на вход блока преобразования информации БПИ.

Рабочий и компенсационный электрические сигналы датчика по определенному алгоритму обрабатываются в БПИ. Например, для снижения большинства дополнительных погрешностей находится их отношение.

Отличительной особенностью конструкции ВОДД отражательного типа, реализующего квазидифференциальный способ преобразования оптических сигналов [7], является то, что оптические волокна компенсационного канала стали воплощать назначение оптических волокон дополнительного

измерительного канала. В этом случае они расположены напротив периферийной части мембраны, которая при воздействии давления испытывает угловые микроперемещения (рис. 4 и 5).

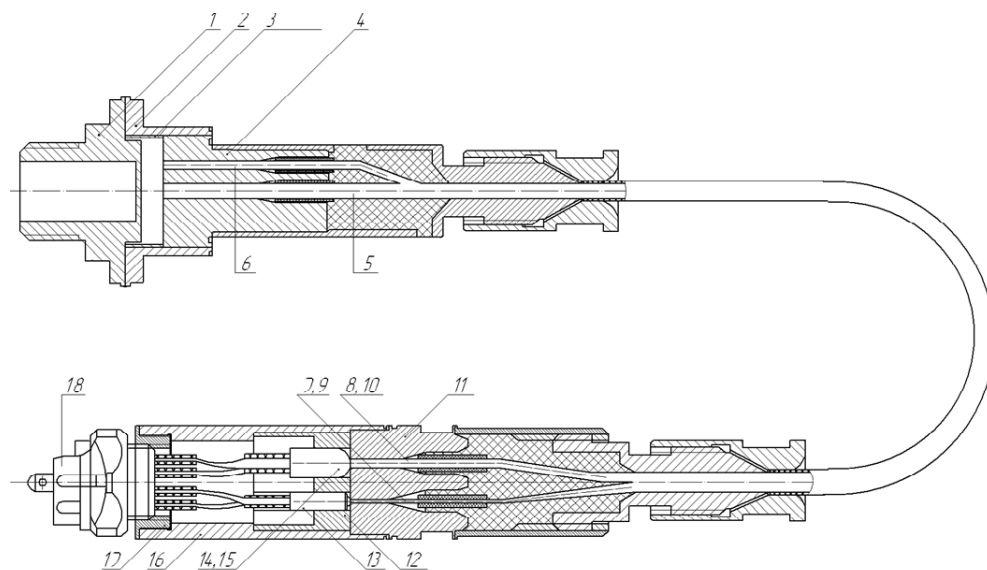


Рис. 4. Первый вариант квазидифференциального ВОДД отражательного типа.
Общий вид

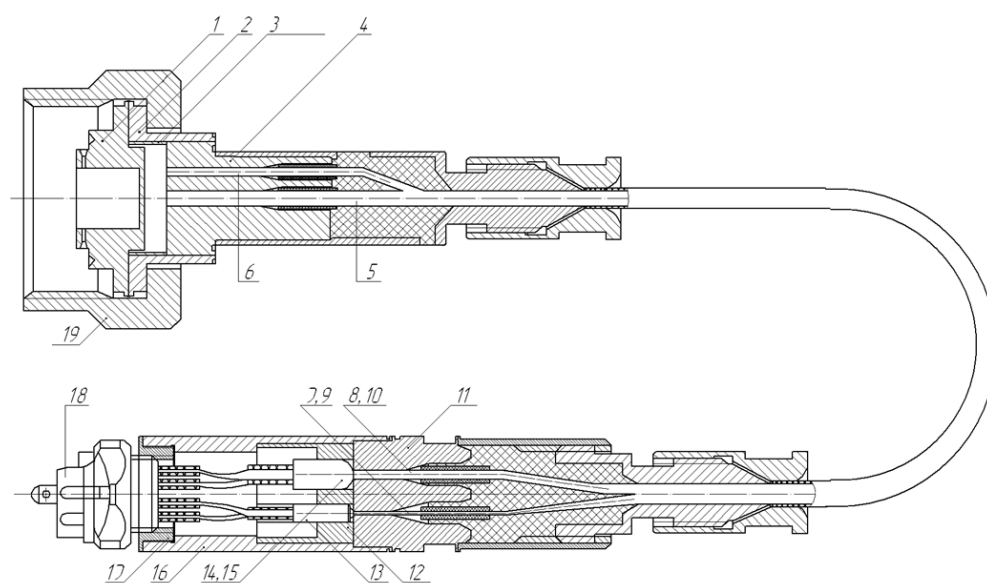


Рис. 5. Второй вариант квазидифференциального ВОДД отражательного типа.
Общий вид

Все остальное конструктивное решение аналогично техническому решению ВОДД с компенсационным каналом. При этом световой поток, излучаемый светодиодом 13, по подводящим ОВ 7 и 9 поступает в зону отража-

ющей поверхности мембраны, прогибаемой под действием измеряемого давления. В результате изменяется интенсивность отраженных от нее световых потоков, поступающих в отводящие ОВ 8 и 10. Изменения оптических сигналов в центральной части мембраны и в периферийной части неодинаковы и имеют разный знак. Это объясняется тем, что в центральной части поверхность мембраны осуществляет плоскопараллельное микроперемещение (в диапазоне 0...100 мкм), а в периферийной – угловое микроперемещение (в диапазоне 0...3 градуса) [7]. С выхода оптических волокон 8 и 10 световые потоки соответствующих каналов поступают на светочувствительные площадки фотодиодов 14 и 15 измерительных каналов, преобразуются в электрические сигналы, которые и поступают на вход БПИ.

Конструктивное исполнение волоконно-оптического кабеля и согласующего устройства представленных вариантов квазидифференциального датчика одинаково (см. рис. 4 и 5).

Отличительная особенность в конструкции корпуса 1 датчика:

- в первом варианте корпус изготавливается с присоединительной резьбой М16х1,5 (см. рис. 4), с помощью которой датчик крепится на исследуемом объекте;

- во втором случае корпус 1 имеет специальный выступ и для крепления на объекте в конструкцию введена накидная гайка 19 из стали 12Х18Н10Т, которая имеет внутреннюю присоединительную резьбу М12х1, с помощью которой закрепляется на объекте.

Заключение

Разработаны конструктивно-технологические решения ВОДД отражательного типа, предназначенные для различных изделий, объектов и для жестких условий применения на основе базовых унифицированных конструкций открытых оптических каналов, отвечающие современным требованиям со стороны заказчиков.

Для потенциальных потребителей рассмотренных датчиков необходимо отметить, что унифицированные конструкции ООК и волоконно-оптического кабеля позволяют их вписать в уже существующие конструктивы «электрических» датчиков, что позволит внедрить их на изделиях без существенных материальных затрат.

Библиографический список

1. Бадеева, Е. А. Требования к ВОДД и разности давлений со стороны информационно-измерительных и управляющих систем ракетно-космической и авиационной техники / Е. А. Бадеева // Актуальные проблемы науки – 2016 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Кузнецк, 2016. – Вып. XI. Технические науки. – С. 213–220.
2. Бадеева, Е. А. Научная концепция проектирования ВОДД с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники / Е. А. Бадеева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 103–114.
3. Разработка теории распределения светового потока в оптической системе ВОП физических величин отражательного типа : монография / Е. А. Бадеева, Л. Н. Коломиец, Н. П. Кривулин, Т. И. Мурашкина, А. Г. Пивкин ; под общ. ред. проф. Мурашкиной Т. И. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2008. – 102 с.

4. Бадеева, Е. А. Конструирование волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа / Е. А. Бадеева // Информационно-измерительная техника, экология и мониторинг : науч. тр. – М. : Росавиакосмос : ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – Вып. 7. – С. 202–213.
5. Бадеева, Е. А. ВОДД отражательного типа для летательных аппаратов / Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, В. А. Мещеряков // Датчики и системы. – 2001. – № 9. – С. 14–18.
6. Пат. 2308689 РФ. Волоконно-оптический датчик давления / Мурашкина Т. И., Пивкин А. Г., Бадеева Е. А. – Оpubл. 20.10.2007, Бюл. № 29.
7. Коломиец, Л. Н. К реализации дифференциального преобразования сигналов в волоконно-оптических преобразователях давления отражательного типа / Л. Н. Коломиец, Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина // Датчики и системы. – 2007. – № 3. – С. 26–28.

Бадеева Елена Александровна

доктор технических наук, профессор,
кафедра бухгалтерского учета,
налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет;
ведущий научный сотрудник,
НТЦ «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Badeeva Elena Aleksandrovna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of accounting, taxation
and auditing,
Penza State University;
leading researcher,
Nanotechnologies Fiber-optical Systems
Scientific and Technological Center
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мурашкина Татьяна Ивановна

доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina@mail.ru

Murashkina Tatiana Ivanovna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики
и электротехники,
Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: krupkina@yandex.ru

Brosttilova Tatiana Yurevna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of power industry
and electrical equipment,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.785.64

Бадеева, Е. А.

Принципы построения, модели и конструкции волоконно-оптических датчиков давления отражательного типа / Е. А. Бадеева, Т. И. Мурашкина, Т. Ю. Бростилова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2 (26). – С. 99–106.