

УДК 621.372.8

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА Поляков А.В.¹, Ксенофонтов М.А.²

¹Белорусский государственный университет

²НИИ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложена конструкция чувствительного элемента квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы рециркуляционного типа для определения концентрации газообразного кислорода. Структура состоит из магнитострикционного материала «металлическое стекло» и волоконного световода, помещенных в однородное магнитное поле. Принцип работы датчика основан на парамагнитных свойствах кислорода. Получены зависимости относительной погрешности метода измерения устройства от длины и радиуса чувствительного элемента, а также от площади сечения магнитострикционной полосы. Установлено, что подбором размеров чувствительного элемента достигается величина относительной погрешности измерений концентраций 0,6 % для чистого кислорода и 2,5 % для воздушной смеси.

Ключевые слова: концентрация кислорода, волоконно-оптический датчик, частота рециркуляции, погрешность измерений.

FIBER-OPTIC OXYGEN CONCENTRATION SENSOR

Polyakov A.¹, Ksenjfontov M.²

¹Belarusian State University

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus

Abstract. The design of the sensitive element of the quasi-distributed fiber-optic recirculation measuring system for determining the concentration of gaseous oxygen is proposed. The structure consists of a magnetostrictive “metallic glass” material and optical fiber, placed in a uniform magnetic field. The principle of the sensor operation is based on the paramagnetic properties of oxygen. The dependences of the relative error of the measuring method device on the length and radius of the sensitive element, as well as on the cross-sectional area of the magnetostrictive strip are obtained. It has been established that the selection of the size of the sensitive element achieves a relative measurement error of 0.6% for pure oxygen and 2.5% for an air mixture.

Key words: oxygen concentration, fiber optic sensor, recirculation frequency, measurement error.

*Адрес для переписки: Поляков А.В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by*

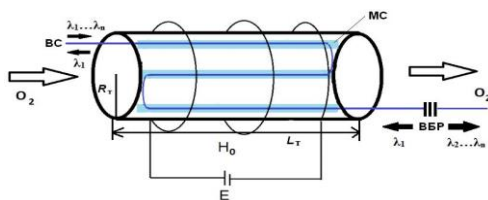
Непрерывное развитие самостоятельного направления в индустрии – кислородной промышленности – обуславливает все возрастающие требования к точности и динамизму измерений при производстве и использовании кислорода. Существует необходимость измерения концентрации кислорода в таких отраслях как металлургия, фармацевтика, электростанции, службы, отвечающие за охрану окружающей среды, медицина и нефтепромышленность. Большинство традиционных электрических датчиков для измерения кислорода основаны на изменении их сопротивления и емкости, которые могут быть легко нарушены с помощью электрического или магнитного поля, кроме того, они будут создавать проблемы безопасности, если они используются в легко воспламеняемых или взрывоопасных случаях. Оптоволоконные датчики газа имеют такие характеристики, как высокая точность, защищенность от воздействия электрических и магнитных полей, пожаро- и взрывобезопасность, устойчивость к агрессивным средам. Проведенный анализ конструктивных решений волоконно-оптических датчиков (ВОД) концен-

трации кислорода, основанных на поглощении, флюоресценции, фосфоресценции [1, 2], показал, что в них оптическое волокно используется, как правило, только как канал передачи информации. Однако современные тенденции развития оптоволоконных измерительных устройств свидетельствуют о том, что волокно может применяться одновременно и в качестве чувствительного элемента и как информационный тракт.

Одним из вариантов воплощения такой концепции является предложенный в работе [3] оптоволоконный измеритель, построенный по схеме интерферометра Фабри-Перо. В основу метода измерений положены парамагнитные свойства молекулярного кислорода. При нахождении в постоянном магнитном поле молекулы O₂ намагничиваются и изменяют магнитное поле, которое приводит к изменению длины магнитострикционного материала и соответственно к изменению длины жестко связанного с ним волоконного световода (ВС). В результате за счет смещения интерференционной картины происходит изменение фототока, протекающего через фотодетектор. Однако, данная схема изме-

рительной системы обладает рядом недостатков: 1. Как любая интерференционная схема, она очень чувствительна к механическим воздействиям, вибрациям и т.п. В результате чего такие структуры не нашли широкого применения на производстве. 2. Отсутствует возможность на одной магнестрикционной полосе уложить большое число витков ВС, поскольку достаточно малый радиус изгиба ВС ведет к дополнительным оптическим потерям и механическим повреждениям волокна. 3. Предложенная структура является точечным измерителем, в то время как сейчас предпочтение отдается распределенным или квазираспределенным датчикам.

Для того, чтобы исключить указанные недостатки, нами предложен новый тип квазираспределенного волоконно-оптического магнестрикционного датчика, принцип измерения которого основан на регистрации изменения частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов на различных длинах волн, распространяющихся в замкнутом оптоволоконном контуре [4]. Волоконный световод разделен на секции волоконными брэгговскими решетками, являющимися спектрально-селективными элементами. В качестве чувствительного элемента использовалось стандартное телекоммуникационное одномодовое волокно 9/125 мкм фирмы Corning, имеющее толщину защитного полиимидного покрытия 65 мкм и полный наружный диаметр $d_b = 255$ мкм. Внутри измерительной трубки (рис. 1) размещены полосы из магнестрикционного материала, называемым «металлическим стеклом».



ВС – волоконный световод; МС – полосы магнестрикционного материала; R_T – радиус измерительной трубки; L_T – длина измерительной трубки; ВБР – волоконная брэгговская решетка

Рисунок 1 – Схема чувствительного элемента волоконно-оптического датчика рециркуляционного типа

На этих полосках расположено достаточно жестко закрепленное оптическое волокно (цианоакрилатом). Поверх этой конструкции навита электрическая катушка для формирования постоянного магнитного поля H_0 во внутреннем объеме трубки. При изменении величины магнитного поля происходит изменение длины магнестрикционных полос, и, следовательно, дли-

ны ВС и как следствие, частоты рециркуляции. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно изогнуто столь сильно, что поверхностные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того, чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие: $d > 500D_{вс} - 2h_1$, где $D_{вс}$ – диаметр оболочки ВС (125 мкм), h_1 – толщина слоя защитного покрытия ($h_1 = 65$ мкм), т. е. $d > 6$ см. Данная структура хорошо согласуется с трубопроводами различного диаметра.

Погрешность измерений ВОД рециркуляционного типа определяется условием, что относительное изменение частоты рециркуляции, вызванное воздействием на ВС, должно превышать максимальную величину относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции χ_{max} для выбранной длины ВС, которая обусловлена влиянием не связанных с измеряемой физической величиной внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для длин ВС $L > 100$ м величина χ_{max} не превышала $2 \cdot 10^{-6}$ [4]. Разработана математическая модель, описывающая принцип работы измерительной системы, позволяющая провести оценку разрешающей способности датчика. Показано, что при длине чувствительного элемента $L_T = 1,5$ м, радиусе $R_T = 0,6$ м и площади сечения магнестрикционной полосы $S_m = 35 \cdot 10^{-6}$ м² относительная погрешность метода измерений не превышает 0,6 % для кислорода и 2,5 % для воздушной смеси. Для достижения данной погрешности интерференционным датчиком [3] необходимо осуществлять регистрацию изменения тока на уровне 0,6 мкА, что является достаточно сложной технической задачей выделения таких малых сигналов на уровне шумов.

Литература

1. Hasumoto, H. Use of an optical oxygen sensor to measure dissolved oxygen in seawater / H. Hasumoto [et al.] // Journal of Oceanography. – 2006. – Vol. 62. – P. 99–103.
2. Preparation and properties of sensing membrane for fiber optic oxygen sensor / J. Deshen [et al.] // Journal of Wuhan University of Tehnology – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 51–53.
3. Липатов, Н. И. Волоконно-оптический магнестрикционный датчик концентрации свободного кислорода / Н. И. Липатов, В. В. Саханова // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 50–53.
4. Поляков, А. В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А. В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014. – 208 с.