

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА

М. Ксенофонтов, А. Поляков, НИИ прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко БГУ, Белоруссия, lab_dozator@mail.ru

Изменение концентрации свободного кислорода в промышленных рабочих зонах способно создавать пожаро- и взрывоопасные ситуации. Предложена конструкция квазираспределенного измерительного устройства на основе волоконно-оптического датчика (ВОД) для оперативного контроля протекающих газовых процессов. В качестве источника излучения используется перестраиваемый кольцевой волоконный лазер. Принцип измерения основан на магнитострикционном эффекте.

Интерес к ВОД возник из-за конструктивной сложности традиционных электронных измерительных систем, а также из-за существенного влияния различных дестабилизирующих факторов на погрешность их измерений. Кроме таких достоинств датчиков, как способность работать при воздействии интенсивных электрических и магнитных полей, стойкость к агрессивным средам, не менее важным преимуществом стала возможность создания на их основе распределенных (квазираспределенных) измерительных систем. Это значит, что один и тот же волоконно-оптический датчик можно использовать для выполнения измерений в большом количестве точек пространства. Полученные данные при этом передаются в виде пространственного распределения соответствующей измеряемой величины. В связи с этим весьма перспективным является применение таких датчиков в нефтяной и химической промышленности, в электроэнергетике, для контроля состояния турбин, котлов, дамб, мостов, плотин.

Для повышения точности измерений с использованием ВОД необходимо пересмотреть идеологию принципов формирования информационных сигналов в таких системах. Следует отказаться от аналоговой модуляции какого-нибудь из параметров потока излучения и перейти к неаналоговой (дискретной) его модуляции, вводя тем самым в поток излучения новые, неоптические, параметры. Другими словами, в процессе модуляции светового потока необходимо осу-

ществить его пространственную или временную дискретизацию таким образом, чтобы обработку параметров промодулированного оптического сигнала можно было производить цифровыми методами. Такой подход позволит сохранить все достоинства ВОД, так как носителем информации остается поток оптического излучения. Вместе с тем, проблема точности измерений посредством ВОД больше не будет связана с точностью измерения интенсивности маломощного потока оптического излучения – она переносится из области оптических измерений в другие, неоптические области. Перспективным решением подобных задач будет переход к частотному (временному) представлению измеряемой величины, использующему зависимость времени задержки оптического излучения в световоде от воздействия измеряемых физических величин. Мониторинг состояния сложных инженерных сооружений и промышленных систем – это неотъемлемая часть их повседневной эксплуатации. Для их контроля используют датчики и измерительные системы различных физических величин: температуры, механических деформаций, давления и т.д. Поэтому разработка новых оптических методов определения концентрации кислорода всегда найдет своего заказчика.

Высокая чувствительность частоты (периода) рециркуляции в замкнутой оптоэлектронной системе к малым внешним воздействиям на волоконный световод позволяет реализовать новый принцип частотного представления инфор-

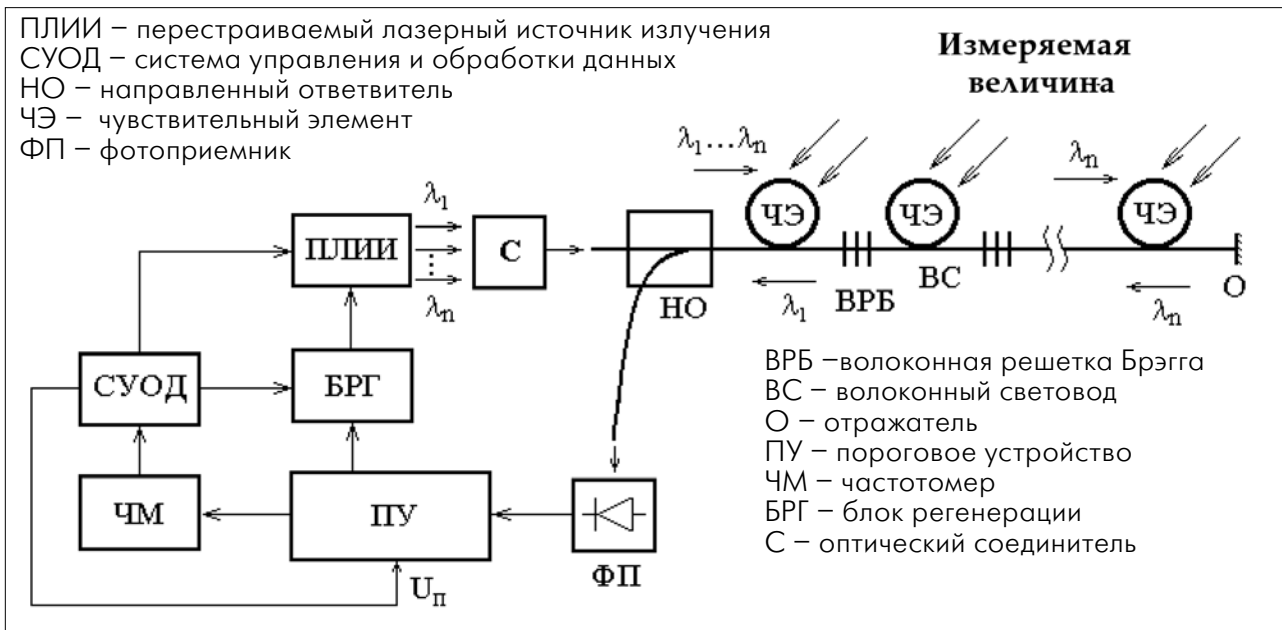


Рис. 1. Схема квазираспределенного ВОД концентрации кислорода рециркуляционного типа

мации. При этом повышение точности измерений достигается за счет идентификации измеряемых физических величин по частоте (периоду) рециркуляции одиночного оптического импульса с его периодическим восстановлением по амплитуде, форме и длительности на каждом цикле циркуляции [1, 2]. Для одновременного измерения концентрации кислорода в нескольких требуемых точках контролируемого объекта нами разработана структура квазираспределенного ВОД кислорода со спектральным разделением каналов. Сущность работы датчика (рис.1) заключена в создании рециркуляции одиночных оптических импульсов с их периодической регенерацией одновременно на нескольких длинах волн.

По сигналу с системы управления и обработки данных (СУОД) блок регенерации (БРГ) генерирует стандартные по амплитуде, длительности и форме начальные импульсы и запускает процесс циркуляции. Данные импульсы поступают на один из входов перестраиваемого лазерного источника излучения (ПЛИИ), на другой вход которого поступает управляющий сигнал с СУОБ, определяющий выбор длины волны излучения ПЛИИ. Импульсы оптического излучения на разных длинах волн от лазерного источника через соединитель (С) и направленный ответвитель (НО) вводятся в волоконный световод (ВС), разделенный на секции волоконными решетками Брэгга (ВРБ). Периоды решеток Брэгга подобраны таким образом, что отражают излучение на определенной длине волны и пропускают все остальные. При этом излучение на последней длине волны просто отражается от зеркального отражателя (О). Отраженное излучение после некоторой задержки τ_0 , определяемой оптической длиной оптоволоконной секции с помощью направленного ответвителя на-

правляется на фотоприемник (ФП). В качестве ФП используется InGaAs-ЛФД типа NEC NR4210 и EG&G Optoelectronics C30645E со спектральной чувствительностью 8,8–9,4 А/Вт для полосы 1 ГГц. Сигнал с фотоприемников поступает на пороговое устройство (компаратор) (ПУ). На его выходе в момент пересечения сигналом порогового уровня формируются импульсы, управляющие блоком регенерации, который снова формирует стандартные по амплитуде, длительности и форме импульсы. Таким образом, цикл рециркуляции замыкается. Полученная после фиксированного времени измерения усредненная частота (или период) рециркуляции с частотомера передается в СУОД, где по заданному алгоритму производится преобразование частоты или периода рециркуляции в измеряемую величину (концентрацию кислорода).

В основе принципа измерений лежит такое специфическое свойство газообразного кислорода, как парамагнетизм, так как именно кислород среди наиболее распространенных газов обладает парамагнитными свойствами, поскольку у него спины обобщенных электронов не скомпенсированы. Физическая сущность парамагнетизма кислорода состоит в том, что молекула кислорода в свободном состоянии обладает постоянным магнитным моментом P_m , не зависящим от внешнего магнитного поля H . Если некоторый объем V , заполненный O_2 , поместить в постоянное магнитное поле H_0 , произойдет его намагничивание, вследствие чего действующее поле H_0 изменится на ΔH :

$$\Delta H = K_{\Sigma} H_0, \quad (1)$$

где K – безразмерный коэффициент (он показывает размер измерительного объема относи-

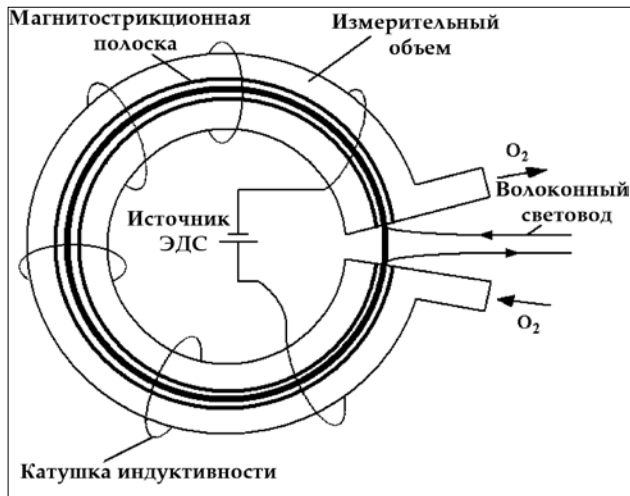


Рис. 2 Чувствительный элемент датчика

тельно единичного); $\chi_{\text{ит}} = \chi_{\text{ит}}(H_0, \theta)$ – парамагнитная восприимчивость единицы объема, зависит от концентрации N_0 и температуры θ кислорода в выбранном объеме. Образец магнитострикционного материала преобразовывает ΔH в изменение своей длины. В результате продольная деформация магнитострикционного материала Δl , помещенного в это поле, с некоторой эффективностью γ преобразовывается в изменение оптического пути $\Delta(nL)$ жестко связанного с ним оптического волокна, где n – показатель преломления и L – длина отрезка волоконного световода (ВС). Изменение оптического пути светового потока приводит к изменению периода рециркуляции ΔT одиночного импульса в замкнутом оптоэлектронном контуре:

$$\Delta T = \frac{\Delta L n_0}{c} \gamma \left(1 - \frac{n_0^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) = \frac{\Delta L n_0}{c} \gamma \xi, \quad (2)$$

где ΔL – изменение длины ВС, подвергающегося деформирующему воздействию; n_0 – показатель преломления сердцевины ВС; c – скорость света; $p_{11}=0,121$ и $p_{12}=0,27$ – коэффициенты Поккельса; $\nu=0,17$ – отношение Пуассона; ξ – коэффициент, обусловленный эффектом фотоупругости материала ВС, который для кварцевого волокна составляет величину 0,78.

Эффективность передачи деформации γ определяется многими факторами, поэтому ее аналитический расчет весьма затруднителен. В то же время в нескольких довольно простых случаях были выполнены экспериментальные измерения этой величины. Оказалось, что типичные значения γ для системы «одномодовое кварцевое волокно без оболочки – тонкая прямоугольная полоска магнитострикционного материала», когда элементы скреплены органическим клеевым составом, попадают в диапазон значений $0,3 \leq \gamma \leq 0,9$. При этом нижняя граница изменяется с частотой, измеряемой в килогерцах, а вер-

хняя граница соответствует постоянному или медленному (≤ 10 Гц) изменяющемуся полю [3].

Важный вопрос – это выбор самого магнитострикционного материала и его наиболее оптимальной геометрической формы. Исследования показали [3], что наиболее предпочтительным магнитным материалом является аморфный ферромагнетик на основе сплава $\text{Fe}_{1-x-y}\text{B}_x\text{Si}_y$ (получивший название «металлическое стекло»). Оптимальная геометрическая форма магнитострикционного элемента – тонкая узкая полоска, квадрат длины которой L_m^2 существенно превосходит площадь ее поперечного сечения S_m . Для оценки фактора формы N , когда геометрия элемента заметно влияет на значение и распределение внутреннего поля в образце для такого элемента можно использовать приближенное выражение $N \approx 8S_m / L_m^2$.

Связь между изменением длины магнитного материала Δl и изменением магнитного поля ΔH , связанным с изменением концентрации кислорода в измерительном объеме, задается соотношением

$$\Delta l / l \approx C H_0 \Delta H (N_0, \theta), \quad (3)$$

где $C = 3 / (2\lambda_s H_c^{-2} (1 + N\mu_m)^2 (nS_f E_f S_m^{-1} E_m^{-1}))^{-1}$ – эффективная константа магнитострикции подсистемы, учитывающая свойства самого ферромагнетика, его формы и механической нагруженности из-за сопряжения волокон. Здесь λ_s – магнитострикция насыщения при слабой анизотропии; H_c – коэрцитивная сила; μ_m – максимальная магнитная проницаемость; n – число витков ВС на магнитострикционной полоске; $S_f = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ и $E_f = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – сечение и модуль упругости ВС, соответственно. Параметры ферромагнетика имеют следующие типичные значения: $\lambda_s = 3 \cdot 10^{-5}$; $H_c = 16 \text{ А/м}$; $\mu_m = 2 \cdot 10^4$; $E_m = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$. Насыщаемость магнитострикционного отклика для элементов из «металлического стекла» начинает заметно проявляться уже при $H_0 \approx 10^3 \text{ А/м}$. Для сравнения, насыщаемость намагниченности кислорода проявляется в полях около 10^7 А/м при температуре $\theta = 300 \text{ К}$.

Зависимость парамагнитной восприимчивости от концентрации N_0 и температуры θ кислорода имеет вид

$$\chi_i = \frac{p_m^2}{3k\theta} \mu_0 N_0, \quad (4)$$

где p_m – магнитный момент молекулы; μ_0 – магнитная постоянная; k – постоянная Больцмана.

Магнитный момент молекулы $p_m = g\sqrt{J(J+1)}\mu_B$, где J – квантовое число; g – множитель Ланде; $\mu_B = h e / 4\pi m_e = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А}\cdot\text{м}^2$ – магнетон Бора. Для кислорода $g=2$, $J=1$.

Подставляя формулы (1), (3) и (4) в (2) и учитывая, что ВС жестко связан с ферромагнетиком, получаем выражение для изменения периода рециркуляции в зависимости от концентрации кислорода

$$\Delta T = 2K C n_0 \xi \gamma \frac{p_m^2}{3k\theta} \mu_0 H_0^2 L_H N_0 / c, \quad (5)$$

где L_H – длина ВС, деформируемого внешним воздействием.

При оценке разрешающей способности датчика следует учитывать, что не вся длина волоконно-оптической секции подвергается деформации, в то время как период рециркуляции определяется всей длиной волоконной секции. Для того чтобы четко дифференцировать магнитострикционное изменение периода рециркуляции и флуктуации периода, обусловленные другими дестабилизирующими факторами, необходимо выполнение следующего условия

$$\Delta T_{\min} \geq \chi_{\max} T, \quad (6)$$

где χ_{\max} – максимальная величина относительной долговременной нестабильности периода рециркуляции, зафиксированная в процессе наблюдения при постоянной температуре.

Из результатов проведенных исследований [4] следует, что при $L > 50$ м $\chi_{\max} \approx 2-3 \cdot 10^{-6}$. Для таких L период рециркуляции практически определяется длиной световода и $T \approx 2n_0 L / c$, где T фиксируются при начальных калибровочных условиях. В этом случае выражение (6) примет вид

$$\Delta T_{\min} \geq \chi_{\max} \frac{2n_0 L}{c}. \quad (7)$$

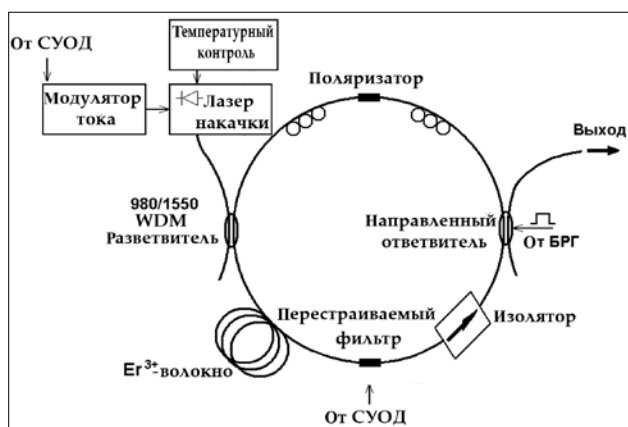


Рис.3. Кольцевой волоконно-оптический перестраиваемый эрбиевый лазер

Из (5) и (7) получаем выражение для анализа разрешающей способности датчика:

$$N_0^{\min} = \frac{3kT \chi_{\max}}{K C n_0 \xi \gamma p_m^2 \mu_0 H_0^2} \frac{L}{L_H}. \quad (8)$$

На рис. 2 показана конструкция чувствительного элемента (ЧЭ). Измерительный объем, имеющий вход и выход для газового потока, это тороидально изогнутая трубка из немагнитного материала объемом 10^{-2} м³, средним радиусом тороида $r_{cp} = 50$ см и диаметром трубки $d = 6$ см. На его внешней поверхности закреплена коль-

необразная полоса ферромагнетика – "металлического стекла" сечением 1,5 см×5 мм. На этой полоске в виде плотно упакованных витков в один ряд расположено оптическое волокно длиной 50 м, жестко закрепленное цианоакрилатом. Поверх этой конструкции навита электрическая катушка индуктивности для формирования во внутреннем объеме тора постоянного магнитного поля $H_0=300$ А/м, что соответствует максимальной магнитной проницаемости. Размеры тороида выбирались таким образом, чтобы относительная неоднородность магнитного поля в объеме тороида δH не превышала 10 %. Неоднородность оценивают согласно выражению: $\delta H=(d/r_2)\cdot 100\%$, где r_2 – внешний радиус тороида.

Проведенные согласно (8) оценки показали, что на основе выбранной конструкции измерительного устройства можно измерять концентрацию кислорода на уровне 10^{25}м^{-3} при комнатной температуре и нормальном давлении при $L_H = 0,9L$. Если увеличить измерительный объем, например, до 1 м^3 , то погрешность измерения концентрации будет составлять единицы процентов.

Предлагаемая схема датчика позволяет получать измеряемую информацию от различных точек волоконно-оптического тракта. Для этого используют метод спектрального мультиплексирования, когда рециркуляция в ВС осуществляется на различных длинах волн. Волоконно-оптический тракт разделен на секции волоконными решетками Брэгга, играющими роль селективных спектральных отражателей. Период каждой решетки подбирается таким образом, что отражение происходит только на определенной длине волны. Проведенные расчеты показали, что для резонансной длины волны отражения $\lambda_c=1550$ нм; длины решетки 10 мм; амплитуды модуляции наведенного показателя преломления $\Delta n=10^{-4}$; диаметра сердцевинки волокна $d_v=9$ мкм; ширина спектра отражения ВБР составляет 0,25 нм по основанию, а коэффициент отражения $R=0,92$.

В качестве источника излучения используется перестраиваемый кольцевой волоконный лазер (рис.3). Лазер имеет однонаправленную кольцевую архитектуру, включающую в себя оптический изолятор, направленный ответвитель, легированное эрбием волокно, накачка которого осуществляется диодным лазером с длиной волны 980 нм. Перестраиваемый полосовой фильтр используется в качестве внутрирезонаторного сканирующего фильтра, имеет полосу пропускания 0,27 нм по уровню 3 дБ и спектральную ширину области перестройки 58 нм. В результате длину волны излучения лазера можно перестраивать в диапазоне 40 нм в пределах длин волн от 1525 нм до 1565 нм. Преимуществом такого источника излучения является существенно более высокая мощность излучения по сравнению с широкополосными светодиодами, которые обычно используются в системах с брэгговскими решетками.

Комбинация перестраиваемого кольцевого лазера и набора волоконных решеток Брэгга с различными периодами позволяет снимать информацию с более чем 100 точек измерения по одному волоконно-оптическому тракту. Однако, как следует из рисунка 1 и формулы (8), увеличение числа точек измерения приведет к снижению чувствительности данного метода измерений из-за увеличения общей длины волоконного световода L . Для компенсации данного явления можно увеличивать измерительный объем. Так, для сохранения погрешности измерений на уровне первого чувствительного элемента измерительный объем десятого ЧЭ нужно увеличить в 11 раз.

Таким образом, предлагаемая конструкция квазираспределенного датчика позволяет получать информацию от нескольких десятков точек измерения по одному волоконно-оптическому тракту. При функционировании в режиме точечного датчика (с одним измерительным объемом) такое устройство способно определять относительную концентрацию кислорода в газовой смеси с погрешностью на уровне 1–2 % при комнатной температуре и нормальном давлении.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф09-094).

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков А.В. Частотная волоконно-оптическая измерительная система. – Датчики и системы, 2008, № 1.
2. Ксенофонтов М.А., Поляков А.В. Волоконно-оптический датчик рециркуляционного типа. – Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2008, № 3.
3. Липатов И.И., Саханова В.В. Волоконно-оптический магнитострикционный датчик концентрации свободного кислорода. – Измерительная техника, 2004, №7.
4. Поляков А.В., Чубаров С.И. Стабильность частоты рециркуляции в кольцевых структурах с волоконно-оптической линией задержки. – Изв. вузов. Приборостроение, 2003, т.46, №5.

ИЗ ИСТОРИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

МЕТОД

Платон и Аристотель стали употреблять слова $\mu\epsilon\theta\alpha$ и $\omicron\delta\omicron\zeta$ ("дорога" и "путь") для обозначения совокупности математических процедур и операций, необходимых для получения результата.

* * *

ГРАФИК

Греческое $\gamma\mu\alpha\phi\iota\chi\omicron\varsigma$ означает "относящийся к письму или живописи". Действительный график ежедневного давления воздуха впервые начертил Р.Плот в 1684 году

Н. Александрова