

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы "ATMEL". — М.: Додека-XXI, 2007. — 432 с.
2. Горбунов В. Л. Однокристалльные микро-ЭВМ // Вычислительная техника и ее применение // Микропроцессоры. — 1989. — № 1. — С. 30—47.
3. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров. Пер. с нем. — К.: МК-Пресс, 2006. — 208 с.
4. Вострухин А. В. Аналого-цифровое преобразование с использованием широтно-импульсной модуляции // Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12. — М.: ИПУ РАН, 2012. — С. 656—661.
5. Пат. РФ № 2298872. Аналого-цифровой преобразователь с управляемой чувствительностью на базе микроконтроллера / А. В. Вострухин // Бюл. — 2007. — № 13.
6. Вострухин А. АЦП на базе микроконтроллера AVR // Схемотехника. — 2006. — № 3. — С. 39—40.
7. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. — М.: ДМК-Пресс, 2011. — 976 с.

Александр Витальевич Вострухин — канд. техн. наук, доцент кафедры "Информационные технологии и электроника" Ставропольского технологического института сервиса (филиал ЮРГУЭС).

☎ 8-918-773-65-11

E-mail: avostrukhin@ya.ru



УДК 681.586.732:

АДАПТИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ ФАЗОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ДАТЧИК РАСТВОРЕННОГО В МОРСКОЙ ВОДЕ КИСЛОРОДА

В. Л. Власов, Д. В. Хлебников, С. А. Тихомиров

Описан адаптивный фазолюминесцентный датчик растворенного в морской воде кислорода, автоматически настраивающийся на максимальную чувствительность к измеряемой величине и имеющий более широкий динамический диапазон в области малых концентраций кислорода, меньшую погрешность и постоянную времени, а также линейную шкалу.

Ключевые слова: парциальное давление, индуцированная люминесценция, частота, фаза, амплитудная модуляция, морская вода, растворимость газов, кислород, датчик, динамический диапазон, адаптивность, океанологический зонд, редокс-слой.

В океанологических исследованиях при измерении вертикальной стратификации гидрофизических и гидрохимических параметров STD-зондами, например, солености S и концентрации растворенного в морской воде кислорода Q используются электрохимические промышленные датчики, которые по принципу работы необратимо потребляют массу самого исследуемого вещества. Поэтому для нормального функционирования таких датчиков и обеспечения необходимой точности измерений требуется непрерывная прокачка морской воды относительно их чувствительных элементов (ЧЭ) с постоянной скоростью. Это значительно усложнило конструкцию прецизионных STD зондов за счет использования специальной помпы и не позволяло измерять микроструктуру стратификации вышеуказанных параметров.

Кроме того, датчики электрохимического типа подвержены влиянию электромагнитных помех, а также старению и загрязнению, во многих случаях необратимому с метрологической точки зрения, из-за конструктивной сложности доступа к ЧЭ для его очистки. Такие датчики кислорода теряют работоспособность в сероводородном слое, что не позволяет точно исследовать редокс-слой.

Существуют оптические люминесцентные датчики кислорода (фото- и фазолюминесцентные), лишенные вышеперечисленных недостатков (например, промышленные фазолюминесцентные датчики (ФД) фирмы

Aanderaa [1] и опытные образцы ИО РАН [2]). Однако, все промышленные люминесцентные кислородные датчики, за исключением опытных образцов ИО РАН, оказываются принципиально несовместимыми с STD-зондами, например, известной фирмы SeaBird из-за их большой постоянной времени (~6—7 с) [3]. Единственным принципиально совместимым с STD-зондами является ФД кислорода ИО РАН с постоянной времени ~0,1 с [2], выполненный электрически, программно и конструктивно совместимым с зондами SeaBird.

В ряде зондирований вертикального профиля концентрации растворенного в морской воде кислорода, проведенных экспедицией ИО РАН в 2007—2008 гг. на Черном море в прибрежной зоне, сравнивался ФД ИО РАН в составе STD-зонда SBE 19+ американской фирмы Sea Bird Electronics с новым (т. е. практически незагрязненным) штатным электрохимическим датчиком кислорода SBE 43 этой же фирмы.

Совпадение профилей, особенно в начальной тонкоструктурной части, было идеальным. Некоторое небольшое систематическое расхождение измеренных величин в начале зондирования было связано со случайно не введенной систематической поправкой в показания ФД ИО РАН. Необходимость некоторой перекалибровки по атмосферному давлению [2] после многочасовых зондирований относится к недостаткам ФД.

Так, наблюдается снижение его чувствительности к кислороду ~1 % после трех часов непрерывной работы вследствие светодеструкции люминофорной пленки. При этом сигнал фотолюминесценции становится меньше, а показатель концентрации кислорода — больше. Показания концентрации кислорода в ml/l вычисляются согласно Океанографическим таблицам UNSCO [4] по формулам, учитывающим парциальное давление кислорода, глубину, температуру и соленость морской воды. Поскольку согласно [2] датчик одновременно работоспособен в воздушной среде, этот недостаток вполне устраним при его использовании в CTD-зондах путем периодической перенормировки показаний по известной величине атмосферного давления [2], однако это недопустимо для долговременных донных станций, где перенормировка невозможна.

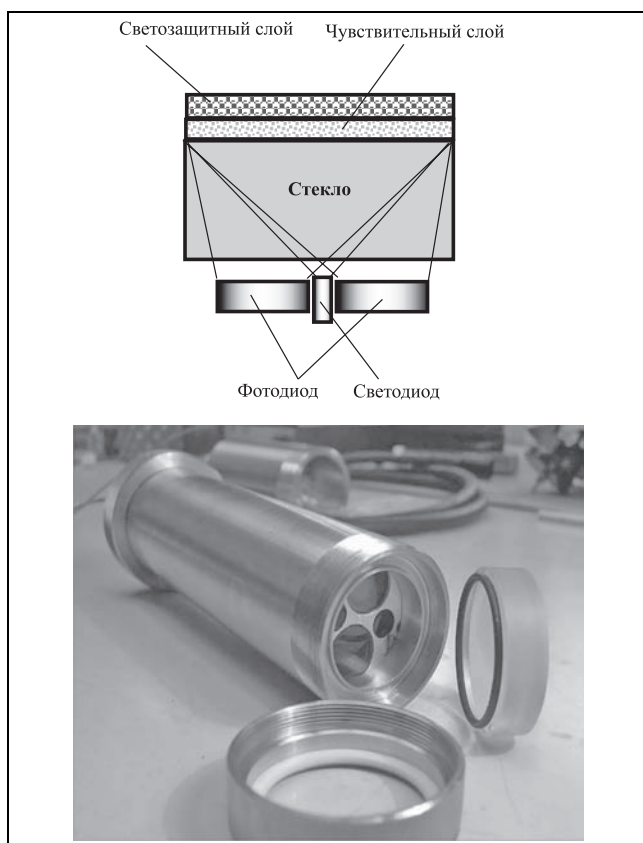
Такого недостатка лишены промышленные ФД фирмы Aanderaa, однако они, как уже было сказано выше, непригодны для зондирования из-за большой постоянной времени.

Рассмотренные датчики определяют парциальное давление кислорода по величине измеряемого сдвига фазы электрических сигналов, возникающих на выходе фотоприемников при облучении кислородно-чувствительной люминофорной пленки датчика амплитудно-модулированным по интенсивности световым излучением от УФ светодиода.

Однако в ФД до сих пор не использовались теоретически известные, но не воплощенные в практику, потенциальные возможности индуцированной люминесценции. Это значительное (на порядок) повышение чувствительности датчика к измеряемому парциальному давлению при оптимальном выборе частоты амплитудной модуляции интенсивности облучающего светового потока от УФ-светодиода в зависимости от величины этого парциального давления — концентрации кислорода (заранее неизвестного). Вследствие этого, казалось бы, неразрешимого логического противоречия, сдвиг фазы в существующих фазолюминесцентных датчиках в настоящее время измеряется на фиксированной частоте (~500 Гц) со всеми вытекающими отсюда последствиями для его чувствительности.

В разработанном нами адаптивном цифровом датчике оптимальная частота амплитудной модуляции автоматически непрерывно подстраивается под заранее неизвестное парциальное давление — концентрацию кислорода, в результате чего достигается максимальная чувствительность датчика во всем диапазоне измеряемых величин парциального давления. Этот результат в свою очередь достигается за счет разработанного нами алгоритма цифровой автонастройки и непрерывной автоподстройки оптимальной частоты амплитудной модуляции (алгоритм и его схемотехническая реализация здесь не раскрываются). Это приводит согласно теории индуцированной люминесценции к повышению чувствительности не менее чем в пять раз в сравнении с промышленным ФД, работающим на фиксированной частоте (~500 Гц).

При этом величина парциального давления определяется не по сложной нелинейной зависимости этого параметра от сдвига фазы, а по строго линейной зави-



Оптическая схема ФД концентрации растворенного кислорода

симости парциального давления от величины оптимальной частоты, являющейся непосредственно измеряемой величиной в отличие от стандартных ФД.

Теоретически получена следующая формула для измерения парциального давления P_i кислорода по величине автоматически устанавливаемой оптимальной частоты f_i амплитудной модуляции интенсивности светового потока от УФ светодиода:

$$P_i = \frac{f_i - f_0}{C f_0}. \quad (1)$$

Здесь $f_0 = 2180$ Гц — оптимальная частота при $P_i = 0$, $C = 9,42 \text{ атм}^{-1}$.

Точные значения f_0 и C определялись экспериментально: f_0 — при парциальном давлении кислорода $P_i = 0$, т. е. практически при максимальном откачивании форвакуумным насосом воздуха из воздушной камеры, в которой находился датчик, а величина C — из формулы (1) при известных значениях f_i , $f_0 = 2180$ Гц и $P_i = 1 \text{ атм}$.

Общая принципиальная оптоэлектронная схема адаптивного ФД совпадает с описанной в [2] оптоэлектронной схемой ФД ИО РАН (см. рисунок), с той разницей, что в ФД (ИО РАН) на выходе фотодиодов измеряется амплитуда, в ФД (Aanderaa) — фаза, а в разработанном интеллектуальном ФД — оптимальная частота вышеуказанной амплитудной модуляции.

Таблица 1

**Временной ряд значений непосредственно измеренной оптимальной частоты модуляции
индуцированной люминесценции и парциального давления при условном вакууме**

Параметр	Значения по 16 точкам								f_{cp}	σ_f	S_f
f_i , Гц	2176 2193	2193 2171	2168 2175	2183 2180	2165 2192	2177 2173	2180 2191	2184 2175	2180	8,99	2,25
									P_{cp}	σ_P	S_P
P_i , атм	0,0042 0,0041	0,0041 0,0041	0,0041 0,0041	0,0042 0,0041	0,0042 0,0041	0,0042 0,0041	0,0042 0,0041	0,0042 0,0041	0,0041	0,00005	0,00001

Таблица 2

**Временной ряд значений непосредственно измеренной оптимальной частоты модуляции
индуцированной люминесценции и парциального давления при атмосферном давлении 745 мм рт. ст.**

Параметр	Значения по 16 точкам								f_{cp}	σ_f	S_f
f_i , Гц	22356 22277	22349 22229	22327 22316	22303 22349	22301 22362	22295 22358	22288 22327	22275 22314	22318	597,6	149,4
									P_{cp}	σ_P	S_P
P_i , атм	0,983 0,979	0,982 0,979	0,981 0,980	0,980 0,982	0,980 0,983	0,980 0,983	0,979 0,981	0,979 0,981	0,9808	0,0014	0,0004

В табл. 1, 2 представлены результаты лабораторных исследований технико-метрологических характеристик разработанного интеллектуального датчика.

В таблицах f_{cp} и P_{cp} — осредненные значения частоты f_i и парциального давления P_i по 16 точкам n . Каждое из этих значений записано в таблицах в две строки. Здесь σ — среднеквадратичная погрешность ряда измерений, $S = \sigma/\sqrt{n}$ — среднеквадратичная погрешность результата измерения (среднего). Как видно из табл. 1, для парциального давления последняя значащая цифра $P_{cp} = 1 \cdot 10^{-4}$ атм. Это означает, что разработанным датчиком может быть измерено минимальное значение парциального давления кислорода $1 \cdot 10^{-4}$ атм. с предельной погрешностью $\pm 3S = 3 \cdot 10^{-5}$ (вероятность 99,7 %), т. е. при этом вышеуказанное минимальное значение парциального давления кислорода будет измерено с точностью 30 %. В то время, как существующие люминесцентные датчики с той же точностью могут измерять лишь на два порядка большее парциальное давление ($1 \cdot 10^{-2}$ атм.) [2]. Разработанный датчик может измерять это же парциальное давление ($1 \cdot 10^{-2}$ атм) с большей на два порядка точностью.

В табл. 2 полученное среднее значение парциального давления, равное 0,9808, совпадает в пределах точности результата измерения $\pm 3S = 0,0012$ атм. со значением атмосферного давления по данным Гидрометцентра, равным $(745/760) \cdot 1$ атм = 0,9803 атм.

Основные технико-метрологические характеристики датчика по результатам лабораторных измерений

Чувствительность, атм 10^{-4} (с предельной погрешностью 30 %)

Динамический диапазон измеряемых парциальных давлений, атм $1 \cdot 10^{-3} \dots 1$

Погрешность измерения, %:

при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ 3

при атмосферном давлении 0,12

Диапазон изменения оптимальной частоты, Гц . . . 2180...22 320

Время одного измерения, с $7,5 \cdot 10^{-3}$

Постоянная времени после всех усреднений, с. 0,15

Датчик выполнен на современных серийных программируемых цифровых микромодулях фирм Anadigm, Analog Devices, Atmel и размещен в прежнем конструктиве разработанного ИО РАН ФД (рис. 1).

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.seabird.com/products/spec_sheets/63data.htm>
2. Власов В. Л., Коновалов Б. В., Мошаров В. Е., Радченко В. Н., Ханаев С. А., Хлебников Д. В. Лабораторные и океанологические исследования фотолюминесцентных сенсоров растворенного в морской воде кислорода // Океанология. — 2010. — Т. 50, № 1. — С. 130—141.
3. <<http://www.aadi.no/Aanderaa/Products/Sensors/OxygenOptode/default.aspx>>
4. UNESCO. International Oceanographic Tables V. 2. National Institute of Oceanography, Wormley and UNESCO. — Paris, 1985. — 141 p.

Владислав Леонидович Власов — канд. техн. наук, вед. научн. сотрудник Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН);

☎ (499) 124-73-92

Email: vlasov@rinet.ru

Дмитрий Вадимович Хлебников — научн. сотрудник ИО РАН;

☎ (499) 124-73-92

Email: dkhlebnikov@mail.ru

Сергей Анатольевич Тихомиров — научн. сотрудник Фрязинского филиала Института радиозлектроники им. В. А. Котельникова РАН. □