

EDN: FAQOVA

УДК 621.383

2.2.6

## РАДИОФОТОННАЯ ИНТЕРРОГАЦИЯ ДАТЧИКА-ДИАФРАГМЫ УРОВНЯ ВОДЫ

*A.Д. Проскуряков, И.И. Нуреев*

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева-КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

**Аннотация.** В этой статье подробно описывается конструкция и анализ радиофотонной системы опроса датчика уровня воды, основанной на мембране и двух адресных волоконных брэгговских структурах.

**Ключевые слова:** радиофотонные измерения, адресная волоконная брэгговская структура, датчик гидростатического давления, контроль уровня воды.

### Введение

Точное измерение уровня воды в резервуарах на основе гидростатического давления требует разработки надёжных и точных датчиков с компенсацией температурных воздействий. Мембранные (диафрагменные) датчики уровня воды обладают преимуществом исключения прямого контакта чувствительного элемента с жидкостью. В сочетании с адресными волоконными брэгговскими структурами (АВБС) такие датчики позволяют реализовать многосенсорные системы с температурной компенсацией. В данной работе представлен анализ и разработка радиофотонной системы интерrogации датчика-диафрагмы уровня воды.

### Материалы и методы

При приложении давления воды к диафрагме её деформацию можно аппроксимировать линейной функцией перепада давления ( $\Delta p$ ). Кроме того, предполагается, что поведение материала диафрагмы также линейно. При использовании этих предположений деформация диафрагмы ( $\varepsilon_d$ ) определяется выражением:

$$\varepsilon_d = \frac{3}{8}(1 + v) \frac{\Delta p a^2}{E_r t^2}, \quad (1)$$

где  $v$  – коэффициент Пуансона материала диафрагмы,  $t$  – толщина диафрагмы,  $a$  – радиус чувствительной зоны диафрагмы,  $E_r$  – модуль упругости (модуль Юнга) диафрагмы, выполненной из эпоксидной смолы (Liquid Lens).

При этом перепад давления возникает за счёт гидростатического давления, которое определяется как:

$$\Delta p = \rho g h, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения, а  $h$  – уровень жидкости.

Оптическое волокно кварцевое, модуль упругости которого, как правило, на несколько порядков выше, чем у эпоксидных мембран. По этой причине оптическое

волокно накладывает ограничения на деформацию мембранны. Предполагая, что результирующая деформация волокна ( $\varepsilon_f$ ) линейно пропорциональна соотношению модуля упругости к диаметрам волокна и мембранны, можно получить:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_d \frac{E_r d_r}{E_f d_f}, \quad (3)$$

где  $d_r$  и  $d_f$  – общий диаметр диафрагмы, в котором проложено волокно, и диаметр оптического волокна соответственно, а  $E_f$  – модуль упругости кварцевого волокна соответственно.

### Результаты исследования

Для используемого кварцевого оптического волокна в расчётах могут быть приняты  $d_f=125$  мкм,  $E_f=70$  ГПа. Для диафрагмы из эпоксидной смолы  $d_r = 50$  мм,  $E_r = 0,0016$  ГПа,  $\nu=0,47$ ,  $t = 1,1$  мм и  $a = 9,5$  мм. Кроме того,  $\rho = 1000$  кг·м<sup>3</sup> и  $g = 9,8$  м·с<sup>2</sup>.

Если анализировать только центральную длину волны, сдвиг длины волны происходит из-за продольных деформаций волокна. Давление, приложенное к диафрагме, приводит к продольной деформации ВБР с двумя симметричными фазовыми  $\pi$ -сдвигами (2π-АВС), а увеличение давления приводит к «красному» смещению её длины волны Брэгга. Передача деформации, предложенная в уравнении (3), связывает деформацию (вызванную давлением), приложенную в направлении диаметра диафрагмы, с деформацией, вызывающей смещение центральной длины волны на 2π-АВС, т.е. продольной деформацией, которая происходит в направлении диаметра волокна.

Чтобы оценить ожидаемое смещение длины волны с ростом уровня, представленные выше параметры подставляются в уравнения (1)-(3), учитывая также

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\varepsilon)\varepsilon_f, \quad (4)$$

где  $P_\varepsilon$  – эффективная фотоупругая постоянная, равная 0,22.

Если уровень воды варьируется от 0 до 500 мм смещение брэгговской длины волны составит 1,3 нм по уровню, а разрешающая способность требуемых измерений должна составлять 0,25-0,3 пм/мм. Совмешённый датчик гидростатического давления и температуры представим как двух сенсорную измерительную систему, построенную на двух 2π-АВС [1, 2]. Обозначим присутствующие в системе два АВС датчика – 2.1 и 2.2, с несовпадающими адресными разностными частотами  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , с положением левой оптической составляющей на  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , и правой оптической составляющей на частотах  $\omega_1 + \Omega_1$  и  $\omega_2 + \Omega_2$ , соответственно. Функциональная схема радиофотонного интерропатора совмешённого датчика на основе двух 2π-АВС с нормировкой выходного сигнала перед фотоприемником представлена на рисунке 1.

Анализ, проведённый в работе показывает, что полоса фильтра 3 должна быть выбрана в диапазоне 1,3 нм по уровню плюс 3 нм для учета изменений температуры воды в диапазоне до 60°C, а АЦП должно обеспечить требуемую разрешающую способность. Датчик 2.1 предназначен для контроля исключительно температуры, датчик 2.2 – температуры и гидростатического давления.

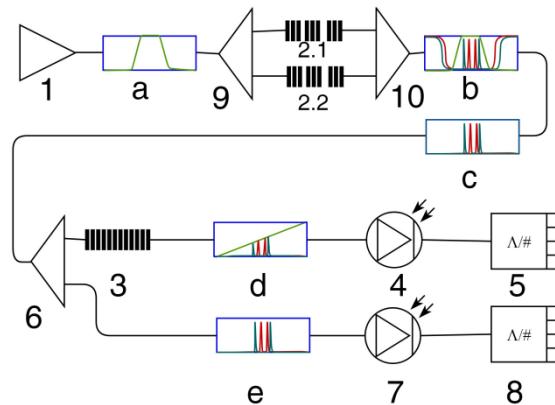


Рис. 1. Функциональная схема радиофотонного интерроргатора:  
 1 – широкополосный лазерный источник; 2.1–2.2 –  $2\pi$ -АВС; 3 – линейный наклонный фильтр;  
 4 – измерительный фотоприемник; 5 – измерительный АЦП; 6 – оптический разветвитель;  
 7 – опорный фотоприемник; 8 – опорный АЦП. Буквами а–е показаны спектры

### Заключение

Разработана радиофотонная система интерроргации датчика уровня воды мембранныго типа на основе двух  $2\pi$ -АВС. Представленная математическая модель позволяет рассчитать деформацию диафрагмы и соответствующее смещение брэгговской длины волны в зависимости от уровня жидкости.

### Список литературы

- Нуреев, И.И. Пассивная волоконно-оптическая квазираспределённая сенсорная сеть контроля уровня воды в дискретных точках резервуара с адресным мультиплексированием / И.И. Нуреев, А.Д. Прокуряков и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 1(61). – С. 77-90.
- Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.

## MICROWAVE PHOTONICS INTERROGATION OF THE WATER LEVEL DIAPHRAGM SENSOR

*A.D. Proskuryakov, I.I. Nureev*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
 10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

**Abstract.** This paper details the design and analysis of a microwave photonics interrogation system for a water level sensor based on a diaphragm and two addressable fiber Bragg structures.

**Keywords:** microwave photonic measurements, instantaneous frequency measurement, frequency comb, photodetection, radar signals.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025г.