

EDN: FAQOVA

УДК 621.383

2.2.6

РАДИОФОТОННАЯ ИНТЕРРОГАЦИЯ ДАТЧИКА-ДИАФРАГМЫ УРОВНЯ ВОДЫ

А.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 интеррогации датчика-диафрагмы уровня воды.

Материалы и методы

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

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

где ν – 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 ρ – 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 мембраны. Предполагая, что результирующая деформация волокна (ε_f) линейно пропорциональна соотношению модуля упругости к диаметрам волокна и мембраны, 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·м³ и $g=9,8$ м·с².

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 π -сдвигами (2 π -АВБС), 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 2 π -АВБС, 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_ε – 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. Совмещённый датчик гидростатического давления и температуры представим как двух сенсорную измерительную систему, построенную на двух 2 π -АВБС [1, 2]. Обозначим присутствующие в системе два АВБС датчика – 2.1 и 2.2, с несовпадающими адресными разностными частотами Ω_1 и Ω_2 , с положением левой оптической составляющей на ω_1 и ω_2 , и правой оптической составляющей на частотах $\omega_1 + \Omega_1$ и $\omega_2 + \Omega_2$, соответственно. Функциональная схема радиофотонного интеррогатора совмещённого датчика на основе двух 2 π -АВБС 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.

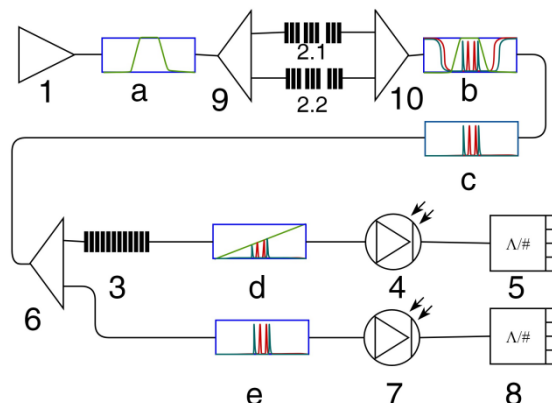


Рис. 1. Функциональная схема радиофотонного интеррогатора:

1 – широкополосный лазерный источник; 2.1–2.2 – 2π -АВБС; 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 интеррогации датчика уровня воды мембранного типа на основе двух 2π -АВБС. Представленная математическая модель позволяет рассчитать деформацию диафрагмы и соответствующее смещение брэгговской длины волны в зависимости от уровня жидкости.

Список литературы

1. Нуреев, И.И. Пассивная волоконно-оптическая квазираспределённая сенсорная сеть контроля уровня воды в дискретных точках резервуара с адресным мультиплексированием / И.И. Нуреев, А.Д. Проскуряков и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2024. – № 1(61). – С. 77-90.
2. 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.