

EDN: LJFTTM

УДК 621.383

2.2.6, 2.2.7, 2.2.8

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРРОГАТОРА ДЛЯ ОПРОСА ДВУХ ЧИРПИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С ФАЗОВЫМ π -СДВИГОМ В СТРУКТУРЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ МЕМБРАННОГО ТИПА

А.Д. Проскуряков, Ю.Л. Зайцев, А.Л. Бамбуркина, И.И. Нуреев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10

Аннотация. Предложен гидростатический датчик уровня жидкости с использованием двух чирпированных волоконных брэгговских решеток с фазовым π -сдвигом (π -ЧВБР) для повышения чувствительности и точности измерения давления и компенсации влияния температуры. Этот инновационный датчик на основе радиофотонных методов опроса позволяет обеспечить погрешность измерения гидростатического давления и высоты водяного столба $\pm 0,1\%$, и погрешность измерения температуры $- \pm 0,01$ °C. Измерение частоты биений между составляющими на частоте окна прозрачности первой π -ЧВБР, встроенной в мембрану датчика и чувствительной к гидростатическому давлению и температуре, и на частоте окна прозрачности второй π -ЧВБР, чувствительной только к температуре и свободно размещена в трубке ввода волокна к мембране, позволяет компенсировать изменения температуры жидкости. В данной статье рассматриваются принципы построения интерроргатора для опроса двух π -ЧВБР в структуре термокомпенсированного гидростатического датчика уровня жидкости мембранныго типа.

Ключевые слова: волоконная чирпированная брэгговская решетка с фазовым π -сдвигом, гидростатическое давление, уровень жидкости, температурная компенсация.

Введение

Существует множество различных традиционных методов измерения уровня жидкости, включая электрические, ультразвуковые, механические и оптические. Среди традиционных методов наиболее распространены электрические датчики уровня жидкости. Однако их применение ограничено, если жидкость является проводящей или взрывоопасной. Оптоволоконные датчики идеально подходят для контроля легковоспламеняющихся или взрывоопасных жидкостей, поскольку в волокне отсутствует электрический ток. Кроме того, поскольку оптоволокно химически инертно, его можно использовать для измерения едких химических веществ. В последнее время было предложено несколько новых конструкций оптоволоконных датчиков уровня жидкости [1]. Во многих из этих методов в различных конфигурациях используются волоконные брэгговские решетки.

Для обычных узкополосных волоконных брэгговских решеток мультиплексивное тепловое и деформационное воздействие обычно снижает точность измерения. Для датчиков гидростатического давления на ЧВБР используется измерение сдвига пика суперпозиции спектров отражения от двух ее секций с различными эффективными показателями преломления оболочки или фиксированного и свободного крепления различных спектральных зон. В этом случае тепловое воздействие компенсируется [2]. Следовательно, датчики уровня жидкости могут использоваться в жестких условиях с резкими перепадами темпера-

тур. Однако в этом случае возникает проблема опроса ЧВБР дорогостоящими и только лабораторными оптическими спектральными приборами [3]. Этот же фактор ограничивает чувствительность и точность измерения.

В данной статье рассматриваются принципы построения интерропратора для опроса двух π -ЧВБР в структуре термокомпенсированного датчика гидростатического давления и уровня жидкости мембранных типа. Данный датчик разработан для повышения чувствительности и точности измерения давления и компенсации влияния температуры. Этот инновационный датчик за счет радиофотонных методов опроса позволяет обеспечить погрешность измерения гидростатического давления и высоты водяного столба погрешностью $\pm 0,1\%$, и погрешность измерения температуры $\pm 0,01$ °C. Фазовый сдвиг открывает в обеих ЧВБР окна прозрачности с узкой полосой пропускания до единиц МГц, что является его спектральной особенностью, близкой по эффекту к пику суперпозиции спектров отражения двух секций ЧВБР с разными параметрами. Измерение частоты биений между составляющими на частоте окна прозрачности первой π -ЧВБР, встроенной в мембрану датчика и чувствительной к гидростатическому давлению и температуре, и на частоте окна прозрачности второй π -ЧВБР, чувствительной только к температуре и свободно размещенной в трубке ввода волокна к мембране, позволяет компенсировать изменения температуры жидкости.

1. Эскизное представление сенсорной части датчика гидростатического давления

На рис. 1 представлен эскиз построения сенсорной части гидростатического датчика уровня жидкости с использованием двух π -ЧВБР.

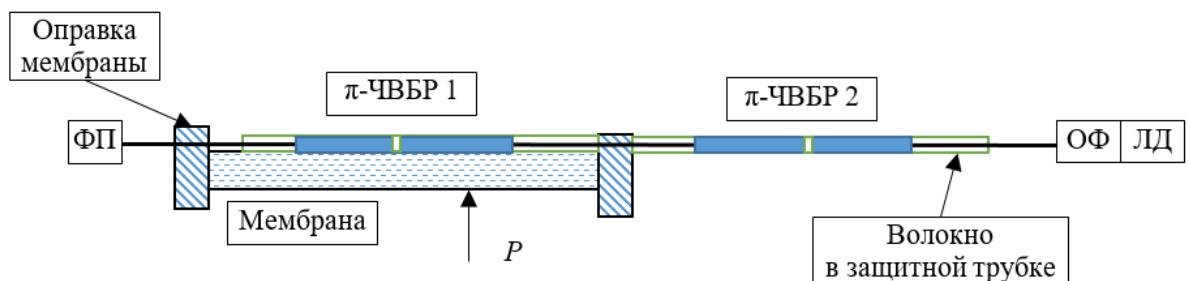


Рис. 1. Эскиз сенсорной части датчика гидростатического давления:
ЛД – лазерный диод; ОФ – оптический фильтр; ФП – фотоприемник;
Р – гидростатическое давление

Мембрана, в которую встроен оптический измерительный датчик π -ЧВБР1, устанавливается внутри емкости с жидкостью в области ее дна, в положении, обеспечивающем минимальное отложение осадков на ней. При этом в любом ее положении воздействие на нее гидростатического давления одинаково по величине, что следует из теории. Последнее время для изготовления мембран широко используется силиконовая резина (ПДМС – полидиметилсилоксан). Оправка мембранны выполнена из жесткого полимера. Оптический опорный датчик π -ЧВБР1 устанавливается в свободном положении в силиконовой защитной трубке, при этом коэффициент отражения опорного датчика в два раза выше чем измерительного, что позволяет фотоприемнику ФП регистрировать излучение, прошедшее через их окна прозрачности, равной амплитуды.

Оптическая система состоит из широкополосного лазерного диода (ЛД), ширина полосы излучения которого учитывает ширину полосы пропускания датчиков (около 2 нм) и возможный диапазон хождения их центральной длины волны в случае изменения температуры до 1 нм при чувствительности ПДМС – 13,8 пм/°C и ЧВБР – 12,1 пм/°C.

Полоса пропускания оптического фильтра ОФ соответствует центральной зоне датчиков – зоне окон прозрачности и составляет около 1,5 нм.

Рассмотрим работу системы опроса опорного и измерительного датчиков в режиме измерения частоты и амплитуды.

2. Принципы работы системы опроса в режиме измерения частоты

На рис. 2 изображены возможные спектры оптического фильтра, оптического опорного датчика и оптического измерительного датчика, где λ – это длина волны, $T(\lambda)$ – это коэффициент пропускания [4].

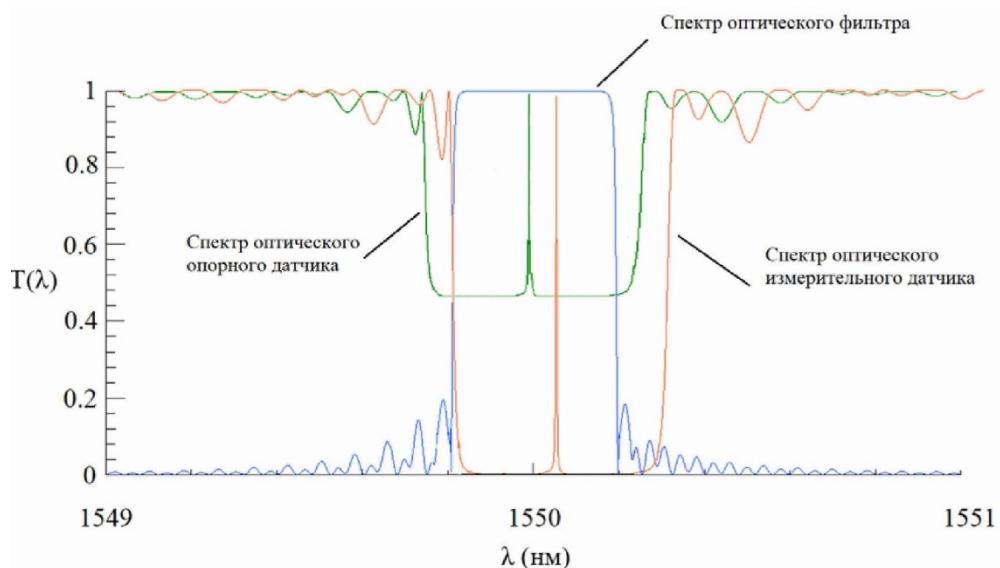


Рис. 2. Возможные спектры прямоугольного оптического фильтра, оптического опорного датчика и оптического измерительного датчика [4]

Рассмотрим работу радиофотонного метода опроса датчиков на основе частотомера. Широкополосное излучение от источника лазерного излучения ЛД (рис. 1) направляется в оптический фильтр ОФ, где выделяется спектральная область длин волн для работы оптических опорного и измерительного датчиков π -ЧВБР1 и π -ЧВБР2 соответственно. В окнах прозрачности из полного спектра света для каждого из датчиков вырезается узкополосный участок $\lambda_{\text{оп}}$, при этом $\lambda_{\text{оп}}$ может совпадать или не совпадать с центральной длиной волны λ_0 оптического опорного датчика. Далее сигнал, прошедший через оптический опорный датчик, попадает в оптический измерительный датчик, в котором ограничивается амплитуда сигнала на $\lambda_{\text{оп}}$ и вырезается узкополосный участок $\lambda_{\text{изм}}$, при этом $\lambda_{\text{изм}}$ может совпадать или не совпадать с центральной длиной волны λ_0 оптического измерительного датчика. При воздействии давления на мембрану узкополосный участок $\lambda_{\text{изм}}$ смещается относительно оси длин волн. Далее сигнал, прошедший через оптический измерительный датчик попадает на фотоприемники ФП, где формируется огибающая биений двух частотных составляющих с частотой, соответствующей разносу $\lambda_{\text{изм}} - \lambda_{\text{оп}} = \Delta\lambda_B$ и постоянной амплитудой. С выхода частотомера, измеряющего частоту биений, сигнал поступает на вход контроллера определения гидростатического давления. Если ОФ имеет равномерную спектральную зависимость, то датчик является независимым от температуры, поскольку изменение температуры одновременно и одинаково влияет на смещение спектров оптических опорного и измерительного датчиков.

Температуру отдельно можно определить по разнице сдвига частоты окна прозрачности опорного датчика по сравнению с его калибровочным значением, заложенным в контроллере.

Предложенный радиофотонный метод осуществляет непрерывное измерение давления как функции разностной частоты. Число оптических опорных датчиков, число оптических измерительных датчиков и число фотоприемников могут выбираться, исходя из поставленной заказчиком задачи для разных точек измерения гидростатического давления. Таким образом может быть выполнен уровень.

3. Принципы работы системы опроса в режиме измерения амплитуды

На рис. 3 изображены возможные спектры оптического фильтра, который в данном варианте выполнен как треугольный, оптического опорного датчика и оптического измерительного датчика, где λ - это длина волны, $T(\lambda)$ – это коэффициент пропускания [5].

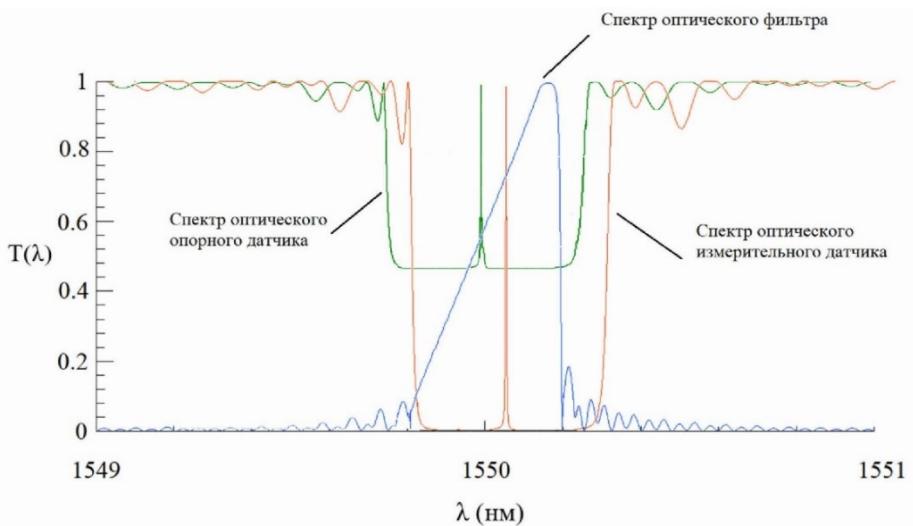


Рис. 3. Возможные спектры треугольного оптического фильтра, оптического опорного датчика и оптического измерительного датчика [5]

В отличие от варианта измерения в режиме частотомера на ФП подается двухтональный сигнал с разной амплитудой. Таким образом, на выходе ФП формируется результирующий сигнал на частоте, соответствующей разносу $\Delta\lambda$ с амплитудой $A_{\text{рез}}$, которая зависит от изменения амплитуды сигнала как с опорного датчика $A_{\text{оп}}$, так и измерительного $A_{\text{изм}}$.

Влияние воздействия температуры в данном варианте датчика, может быть скомпенсировано одновременным и одинаковым смещением спектров оптического опорного и измерительного датчиков по отношению к стабильной линейной характеристике наклонного ОФ.

Широкополосный ЛД генерирует непрерывное лазерное излучение, которое поступает в оптическое волокно (ОВ). Гидростатическое давление преобразуется в деформацию в направлении оси ОВ, так что измерительная решетка растягивается, что приводит к смещению частоты ее окна прозрачности ω_m :

$$\omega_m = \omega_0 \pm \Omega_m, \quad (1)$$

где ω_0 – брэгговская частота опорной решетки, совпадающая при начальной калибровке (пустая емкость) с частотой измерительной, а соответствующий сдвиг частоты измерительной решетки равен Ω_m и её знаку.

В общем случае двухчастотное оптическое излучение, сформированное после прохождения окон прозрачности π -ЧВБР1,2 можно записать как:

$$\Phi = A \sin \omega_0 t + B_M \sin(\omega_0 \pm \Omega_M) t, \quad (2)$$

где A и B_M – амплитуды составляющих от соответствующих окон прозрачности с учетом различных коэффициентов отражения решеток.

При этом их амплитуды зависят от положения окон прозрачности относительно наклонной амплитудно-частотной характеристики ОФ.

Уравнение оптического фильтра с наклонной АЧХ. Параметры угла наклона и смещения линейного наклонного фильтра выбираются исходя из параметров измерительной системы, и считаются известными. Упрощенное уравнение, описывающее частотную ширину склона ОФ во всем диапазоне измерений, описывается как:

$$L(\Omega) : L(\Omega_{\min}) = L_0 \cup L(\Omega_{\max}) = L_1, \quad (3)$$

где Ω_{\min} – минимальная частота оптического фильтра, которая определяется при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ и наличии давления полной емкости жидкости, а Ω_{\max} – максимальная частота оптического фильтра, которая определяется при $+4^{\circ}\text{C}$ и отсутствии жидкости.

За опорную можно выбрать любую частоту, лежащую внутри диапазона частот фильтра, например, частоту окна прозрачности опорного датчика ω_0 , соответствующую комнатной температуре 22°C при отсутствии жидкости.

Получим:

$$b = \frac{L_0 + L_1}{2}; \quad k = \frac{L_1 - L_0}{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}; \quad L(\Omega_i) = k\Omega_i + b. \quad (4)$$

Следовательно, ФП принимает двухчастотное лазерное излучение с неравными амплитудами, определяемыми характеристиками окон прозрачности решеток и фильтра, а также положением частотных составляющих относительно его спектральной характеристики.

Сигналы биений на выходе ФП описываются как

$$I = \Re \left[A^F \sin \omega_0 t + B_M^F \sin(\omega_0 \pm \Omega_M) t \right]^2 \sim \\ \sim + B_M^{F^2} + 2A^F B_M^F \cos \Omega_M t \right], \quad (5)$$

где A^F и B_M^F – амплитуды составляющих от соответствующих окон прозрачности, с учетом характеристики ОФ; \Re – коэффициент оптико-электронного преобразования ФД.

Полученный на выходе ФД сигнал поступает на частотомер и устройство цифровой обработки, где анализируется с помощью алгоритмов БПФ для вычисления коэффициентов амплитудной модуляции биений между составляющими окон прозрачности π -ЧВБР1,2, и далее расшифровываются в режиме реального времени для фиксации и определения характеристик их частотных сдвигов, пропорциональных давлению жидкости и окружающей температуре.

Определим коэффициент модуляции для сигнала биений опорной и измерительной решеток, прошедших наклонный фильтр и ФП:

$$m = \frac{2 \cdot A^F \cdot B_M^F}{A^F + B_M^F}, \quad (6)$$

В частотном значении получим

$$m(\Omega_M) = \frac{(k\omega_0 + b)^2 - k^2\Omega_M^2}{(k\omega_0 + b)^2 + k^2\Omega_M^2}. \quad (7)$$

Величина разностной частоты Ω_M меняется в диапазоне от Ω_{\min} до Ω_{\max} , значения которых определены параметрами системы. При этом $\Omega_{\max} \ll \omega$, а значит числитель выражения (7) всегда положителен, следовательно, значения функции $m(\Omega_M)$ принадлежат интервалу $(1, 0)$, а сама функция $m(\Omega_M)$ является монотонно убывающей ($m(\Omega_M) < 0 \forall \Omega_M > 0$), при $\Omega_M \in (\Omega_{\min}, \Omega_{\max})$. Монотонность коэффициента модуляции $m(\Omega_M)$ позволяет однозначно связать разностную частоту Ω_M с измеренной величиной коэффициента модуляции. Таким образом, величина коэффициента модуляции содержит полную информацию, необходимую для определения разностной частоты Ω_M .

На рис. 4 показана условная измерительная характеристика разработанного датчика.

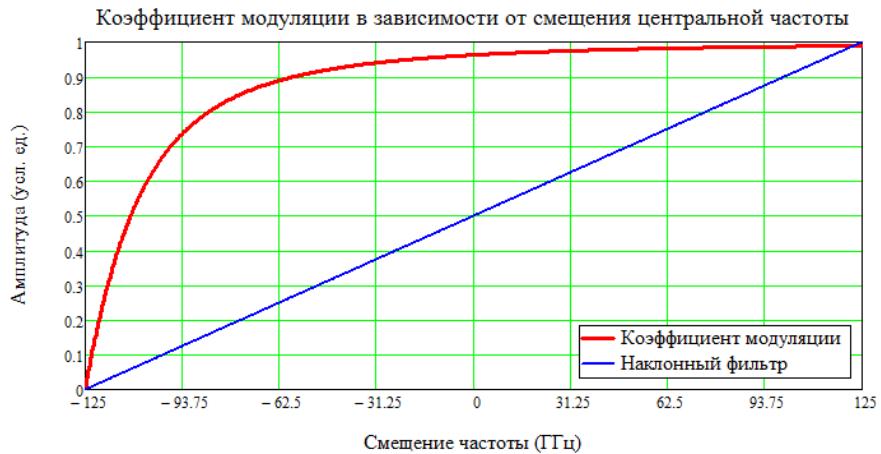


Рис. 4. Зависимость коэффициента модуляции огибающей на выходе фотоприемника от разностной частоты $\Delta\lambda$

Показанная разностная частота в ± 125 ГГц условна. Она может быть обеспечена параметрами опорной и измерительной решетки, но не практична с точки зрения измерений на реальной элементной базе, которая сегодня хорошо обеспечена для работы в диапазоне ± 40 ГГц, который и рекомендуется для построения датчика.

Зная амплитуду составляющей для калибровочного значения ω_0 и найдя частоту биений для опорной решетки Ω_O , можно определить компенсационное значение по температуре [6]. Для решения задач калибровки, учитывая монотонную зависимость коэффициента модуляции $m(\Omega_O)$ от разностной частоты Ω_O , можно пропустить промежуточные вычисления, и построить функциональную зависимость температуры от величины коэффициента модуляции:

$$T(m(\Omega_O)) = \sum_{k=0}^K a_k m^k(\Omega_O), \quad (8)$$

где a_k – коэффициенты аппроксимирующего полинома, а K – его степень.

Поиск коэффициентов зависимости (8) ведется методом наименьших квадратов, для чего на испытательном стенде проводится серия D измерений, формируется набор значений заданной температуры T_j и измеренных значений коэффициента модуляции $m_j(\Omega_0)$, $j = 1, 2, \dots, D$. После чего, найдя минимум функционала

$$\Psi(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^D \left(T_j - \sum_{k=0}^K a_k m_j^k(\Omega_0) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

получим искомое выражение зависимости действующей температуры от величины $m(\Omega_0)$.

Путем измерения в микроконтроллере сдвига частоты сигнала биений от опорной и измерительных π -ЧВБР1,2 с учетом изменений температуры, можно определить величину соответствующего ей гидростатического давления P .

Высота столба жидкости h может быть определена по гидростатическому давлению по формуле:

$$P = \rho g h, \quad (10)$$

где каждые 10 см повышения уровня воды эквивалентны 0,981 кПа ~ 1 кПа гидростатического давления.

Инновационный датчик на основе радиофотонных методов опроса позволяет обеспечить погрешность измерения гидростатического давления и высоты водяного столба $\pm 0,1\%$, и погрешность измерения температуры $- \pm 0,01$ °С. Данные оценки получены в ряде работ для аналогично использованных методов опроса, например, для опроса адресных волоконных брэгговских структур [7-11] или мгновенного измерения неизвестных радиочастот микроволнового диапазона [12-17].

Заключение

Данное исследование успешно продемонстрировало, новый метод опроса двух π -ЧВБР в структуре термокомпенсированного датчика гидростатического давления и уровня жидкости мембранныго типа. Данный датчик разработан для повышения чувствительности и точности измерения давления и компенсации влияния температуры. Этот инновационный датчик на основе радиофотонных методов опроса позволяет обеспечить погрешность измерения гидростатического давления и высоты водяного столба $\pm 0,1\%$, и погрешность измерения температуры $- \pm 0,01$ °С. Фазовый сдвиг открывает в обеих ЧВБР окна прозрачности с узкой полосой пропускания до единиц МГц, что является его спектральной особенностью, близкой по эффекту к пику суперпозиции спектров отражения двух секций ЧВБР с разными параметрами. Измерение частоты биений между составляющими на частоте окна прозрачности первой π -ЧВБР, встроенной в мембрану датчика и чувствительной к гидростатическому давлению и температуре, и на частоте окна прозрачности второй π -ЧВБР, чувствительной только к температуре и свободно размещенной в трубке ввода волокна к мембране, позволяет компенсировать изменения температуры жидкости. Интерроратор для нового гидростатического датчика уровня жидкости содержит только оптический фильтр и фотоприемник, что существенно снижает его стоимость по сравнению с другими известными вариантами интеррораторов для датчиков мембранныго типа, регистрирующих спектральные характеристики их брэгговских чувствительных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по программе Приоритет-2030.

Список литературы

1. Sun C. Liquid level and temperature sensing by using dual-wavelength fiber laser based on multimode interferometer and FBG in parallel / C. Sun, Y. Dong, M. Wang, and S. Jian // Opt. Fiber Technol. – 2018. – Vol. 41. – P. 212-216.
2. Vorathin E. A Novel Temperature-Insensitive Hydrostatic Liquid-Level Sensor Using Chirped FBG / E. Vorathin, Z. M. Hafizi, A. M. Aizzuddin, M. K. A. Zaini, and K. S. Lim // IEEE Sensors journal. – 2019. – V. 19, No. 1. – P. 157-162.
3. Chang Hung-Ying. An Ultra-Sensitive Liquid-Level Indicator Based on an Etched Chirped-Fiber Bragg Grating / Hung-Ying Chang, Yu-Chung Chang, Hao-Jan Sheng, Ming-Yue Fu, Wen-Fung Liu, and Raman Kashyap // IEEE Photonics technology letters. – 2016. – V. 28, No.3. – P. 268-271.
4. Патент 203788 Российская Федерация, МПК G01L 1/24 (2006.01). Волоконно-оптическое устройство измерения давления / Эшпай Р.А., Тяжелова А.А., Морозов О.Г. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» (RU). - № 2020141292; заявл. 15.12.2020., опубл.: 21.04.2021; Бюл. № 12.
5. Патент 204013 Российская Федерация, МПК G01L 1/24 (2006.01). Волоконно-оптическое устройство измерения давления / Эшпай Р.А., Тяжелова А.А., Морозов О.Г. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» (RU). - № 2020141298; заявл. 15.12.2020., опубл.: 04.05.2021; Бюл. № 13.
6. Sahabutdinov A.Z. Calibration of combined pressure and temperature sensors / A.Z. Sahabutdinov, A.A. Kuznetsov, I.I. Nureev et al. // International Journal of Applied Engineering Research. - 2015. - Vol. 10(24). - P. 44948-44957.
7. Il'In G.I. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application / G.I. Il'In, O.G. Morozov and A.G. Il'In // Proc. of SPIE. - 2014. - Vol. 9156. - P. 91560M.
8. Morozov O.G. Two-frequency analysis of fiber-optic structures / O.G. Morozov, D.L. Aibatov, G.I. Il'in et al. // Proc. of SPIE. - 2006. - Vol. 6277. - P. 62770E.
9. Morozov O.G. Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum / O.G. Morozov, D.L. Aybatov // Proc. of SPIE. - 2007. - Vol. 6605. - P. 660506.
10. Morozov O.G. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / O.G. Morozov, O.G. Natanson, D.L. Aybatov et al. // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 7026. P. 70260I.
11. Morozov O.G. Metrological aspects of symmetric double frequency and multi frequency reflectometry for fiber Bragg structures / O.G. Natanson, D.L. Aybatov, V.P. Prosvirin, et al. // Proc. of SPIE. - 2008. - Vol. 7026. - P. 70260J.
12. Морозов О.Г. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники / О.Г. Морозов, Г.И. Ильин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2014. - № 1 (20). - С. 6-42.
13. Morozov O.G., External amplitude-phase modulation of laser radiation for generation of microwave frequency carriers and optical poly-harmonic signals: an overview / O.G. Morozov, G.I. Il'in, G.A. Morozov et al. // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 980711.
14. Morozov O.G. RZ, CS-RZ, and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions / O.G. Morozov // Proc. of SPIE. – 2012. – Vol. 8410. – P. 84100P.

15. Ivanov A.A. Multiple frequencies analysis in tasks of FBG based instantaneous frequency measurements / A.A. Ivanov, A.J. Sakhabutdinov, O.G. Morozov et al. // Proc. of SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740Y.
16. Ivanov A.A. Microwave photonic system for instantaneous frequency measurement based on principles of "frequency-amplitude" conversion in fiber Bragg grating and additional frequency separation / Ivanov A.A., Morozov O.G., Andreev V.A., Kuznetsov A.A., Faskhutdinov L.M., Morozov G.A. // Proc. of SPIE. – 2017. – Vol. 10342. – P. 103421A.
17. Морозов О.Г. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов, А.А. Талипов, А.А. Федоров и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146-149.

PRINCIPLES OF DESIGNING AN INTERROGATOR FOR TWO CHIRP-PHASE-SHIFTED FIBER BRAGGING GRATINGS WITH π -PHASE SHIFT IN THE STRUCTURE OF A THERMOCOMPENSATED HYDROSTATIC MEMBRANE-TYPE LIQUID LEVEL SENSOR

A.D. Proskuryakov, Yu.L. Zaitsev, A.L. Bamburkina, I.I. Nureyev

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

Annotation. A hydrostatic liquid level sensor is proposed using two chirped fiber Bragg gratings with a π -phase shift (π -CFBGs) to increase the sensitivity and accuracy of pressure measurements and compensate for temperature effects. This innovative sensor, using radiophotonic interrogation methods, achieves a hydrostatic pressure and water column height measurement accuracy of $\pm 0.1\%$, and a temperature measurement accuracy of $\pm 0.01^\circ\text{C}$. Measuring the beat frequency between components at the transparency window frequency of the first π -FBG, embedded in the sensor membrane and sensitive to hydrostatic pressure and temperature, and at the transparency window frequency of the second π -FBG, sensitive only to temperature and freely positioned in the fiber input tube to the membrane, allows for compensation for changes in liquid temperature. This article discusses the design principles of an interrogator for two π -FBGs within the structure of a temperature-compensated hydrostatic membrane-type liquid level sensor.

Keywords: π -phase-shifted fiber Bragg grating, hydrostatic pressure, liquid level, temperature compensation.

Статья представлена в редакцию 01 декабря 2025 г.