

УДК 006.91

В. Ю. Кучерук, д. т. н., проф.; С. М. Довгалець, к. т. н, доц.;
І. П. Борщова; П. А. Хомчук

ОПТИЧНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ РІВНЯ РІДИНИ

Проведено аналіз основних оптичних методів вимірювання рівня рідини. Запропоновано оптичний вимірювальний перетворювач рівня рідини, чутливі елементи якого виконано з діелектрика з від'ємним показником заломлення.

Ключові слова: оптичний метод, рівень, перетворювач рівня рідини, хвилевід, від'ємний показник заломлення, чутливий елемент, спектр.

Вступ. Вимірювання рівня рідини є актуальним питанням контролю стану середовища. Вибір приладу вимірювання рівня рідини залежить перш за все від її властивостей, умов зберігання й параметрів навколишнього середовища.

Аналіз попередніх досліджень. В умовах високого тиску, низької чи високої температури, вибухо- чи пожежонебезпечного робочого середовища найбільш розповсюдженими методами вимірювання рідини є механічні, електромеханічні, методи на основі вимірювання опору при постійному та змінному струмі, термічний метод, ультразвуковий тощо. Але ці методи потребують застосування додаткових засобів для забезпечення нормальної роботи приладів у специфічних умовах, що призводить до підвищення вартості відповідних пристроїв. Тому для вимірювання рівня рідини зі стаціонарною поверхнею використовуються оптичні методи.

Безконтактні оптичні методи базуються на відбитті світла від поверхні рідини. Наприклад, відомий оптичний вимірювач рівня рідини в резервуарах, що має калібрувальний стрижень, який приєднаний нижнім кінцем до поплавка для піднімання чи опускання з рівнем рідини [1]. Контактні оптичні методи базуються на розповсюдженні світла через оптичний хвилевід, який занурюється в рідину. Наприклад, рівнемір, що базується на імпульсному методі відбору частинок за часом прольоту [2].

Недоліком безконтактних методів є висока похибка вимірювання, а контактних – невеликий діапазон вимірюваної величини, що обмежений довжиною чутливого елемента.

Метою роботи є розробка рівнеміру підвищеної точності та чутливості з розширеним діапазоном вимірювання у складних специфічних умовах.

Матеріали та результати досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно сформулювати параметри чутливого елемента, який задовольняв би таким наступним вимогам:

- 1) чутливий елемент довжиною L представляє собою діелектричний стрижень із серцевиною, що має показник заломлення n_1 і оболонкою з показником заломлення n_2 ;
- 2) елемент частково занурений в рідину з показником заломлення n_3 на відстань h ; над рідиною міститься газоподібне середовище з показником заломлення n_3' ;
- 3) оптичне випромінювання потужністю P_0^* подається в торець чутливого елемента, вихідна потужність P^* реєструється на протилежному кінці елемента.

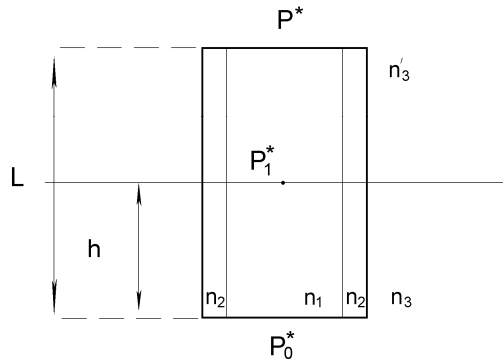


Рис. 1. Структура чутливого елемента

Така структура чутливого елемента є відомою, оскільки була раніше опублікована [3]. Але відмінність запропонованого пристрою полягає в тому, що серцевина хвилеводу виготовлена з матеріалу, що має від'ємний показник заломлення. Особливими властивостями матеріалів із від'ємним показником заломлення є: негативне заломлення, одночасно від'ємні електрична й магнітна проникності, антипаралельність групової та фазової швидкостей [4].

Чутливий елемент умовно розбивається на дві частини, які перебувають в різних середовищах. Потужність на виході тієї частини, що перебуває в рідині, визначається як:

$$P_1^* = P_0^* \cdot e^{-2\alpha h} \quad (1)$$

Потужність на виході частини елемента, що перебуває в газі, відповідно визначається як:

$$P^* = P_1^* \cdot e^{-2\alpha'(L-h)} \quad (2)$$

де α , α' – коефіцієнти згасання світла, розповсюдженого у хвилеводі, що перебуває в двох середовищах.

Тоді загальна потужність світла тієї частини елемента, що знаходиться на межі двох середовищ, запишеться як:

$$P^* = P_0^* \cdot e^{2h(\alpha' - \alpha) - 2\alpha'L} \quad (3)$$

Коефіцієнти згасання α та α' визначаються як уявні частини сталої розповсюдження, отриманої під час розв'язання характеристичного рівняння запропонованого хвилеводу, відповідно для рідкого і газоподібного середовищ. Характеристичне рівняння тришарового плоского хвилеводу має вигляд:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) \pm k_3 \frac{k_1}{k_2} \frac{m_2}{m_1} \tan(k_2 d) \tan^{\pm 1}(k_1 L) - k_3 = 0, \quad (4)$$

де $k_1^2 = k^2 n_1^2 - h^2$, h – стала розповсюдження, $n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ – показник заломлення серцевини, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - h^2$, $n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2 + i\alpha_2}$ – показник заломлення оболонки, α_2 – коефіцієнт згасання світла в оболонці, $k_3^2 = h^2 - k^2 n_3^2$, $n_3 = \sqrt{\epsilon_3 \mu_3}$ – показник заломлення зовнішнього середовища, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число вільного простору, λ – довжина хвилі, $2L$ – геометричні розміри серцевини, d – геометричні розміри оболонки.

Коефіцієнт згасання світла в серцевині приймається таким, що в порівнянні з α , α' та α_2 ним можна знехтувати. Отримані при розв'язку рівняння (4) значення α , α' підставляються в рівняння (3), і будується залежність потужності на виході хвилеводу від рівня рідини. На

основі отриманого характеристичного рівняння залежність будується для хвилеводу, сердцевина якого має ВПЗ, і для класичного хвилеводу, сердцевина якого має одночасно додатні значення магнітної і діелектричної проникностей (називатимемо такий матеріал матеріалом із додатнім показником заломлення ДПЗ).

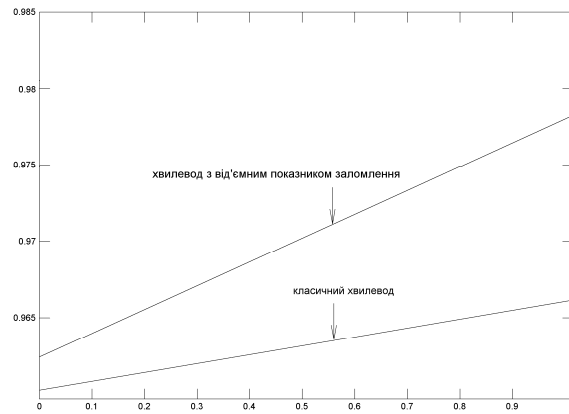


Рис. 2. Залежність вихідної потужності світла від рівня рідини

Нахил залежності для хвилеводу із ВПЗ сердцевини вищий, ніж для хвилеводу із ДПЗ, тому чутливість датчиків на основі таких хвилеводів буде вищою. Як було показано в [5], двошарові хвилеводи із ВПЗ сердцевини мають особливий модовий склад. Для дослідження модового складу запропонованої тришарової структури необхідно побудувати залежність приведеної частоти:

$$V = 2kL\sqrt{n_1^2 - n_3^2}, \quad (5)$$

від нормованої сталої розповсюдження:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3} \quad (6)$$

Під час побудови залежності параметр V змінюється за рахунок параметра n_3 – показника заломлення зовнішнього середовища.

Відсічка другої моди відбувається при $V = V_2$ і $b = 0$:

$$b = \frac{\frac{h}{k} - n_3}{n_1 - n_3} = 0 \Rightarrow h_2 = kn_3,$$

де h_2 – стала розповсюдження, при якій відбувається відсічка другої моди. Підставивши дане значення сталої розповсюдження в характеристичне рівняння (4), отримане рівняння запишемо як:

$$\frac{m_3}{m_2} k_2 \tan(k_2 d) \pm \frac{m_3}{m_1} k_2 \tan^{\pm 1}(k_1 L) = 0, \quad (7)$$

де $k_1^2 = k^2 n_1^2 - k^2 n_3^2$, $k_2^2 = k^2 n_2^2 - k^2 n_3^2$.

Розв'язуючи це рівняння відносно змінної n_3 , при всіх інших заданих параметрах отримаємо таке значення ПЗ зовнішнього середовища, при якому у хвилеводі настає відсічка другої моди. Визначивши за отриманим розв'язком приведену частоту, визначимо значення $V_2 = 2.132$, яке незалежно від величини параметрів хвилеводу забезпечує відсічку другої

моди.

Наявність у хвилеводі із ВПЗ серцевини області непропускання випромінювання, при подачі на його вхід монохромного світла, забезпечує перервність спектру випромінювання на його виході (рис. 3).

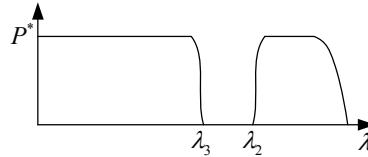


Рис. 3. Спектр випромінювання на виході хвилеводу із ВПЗ

На рис. 3 λ_2 та λ_3 – довжини хвиль, що відповідають приведеним частотам V_2 та V_3 . Виходячи із отриманого значення приведеної частоти в момент відсічки другої моди й формули (5), встановлюється залежність між довжиною хвилі, на якій буде забезпечуватися відсічка другої моди в цьому хвилеводі від ПЗ зовнішнього середовища $\lambda_2 = f(n_3)$:

$$\lambda_2 = \frac{2\pi}{V_2} L \sqrt{n_1^2 - n_3^2} = 2.947 L \sqrt{n_1^2 - n_3^2} \quad (8)$$

Значення довжин хвиль відсічки, як видно з рівняння (8), залежать від показників заломлення рідкого та газоподібного середовища і не залежать від рівня рідини. Отже, із вихідного спектра визначається значення довжини хвилі λ_2 , за яким визначається за наведеною залежністю ПЗ зовнішнього середовища n_3 . Це дозволяє усунути складові похибки, котрі виникають за рахунок впливу температури та тиску на оптичні властивості зовнішніх середовищ і самого хвилеводу. Підставляючи отримане значення n_3 в характеристичне рівняння і розв'язуючи його, отримуємо комплексну сталу розповсюдження, уявна частина якої є коефіцієнтом розсіювання: α і α' в залежності від того, в якому середовищі знаходиться хвилевід, тобто в залежності від n_3 . Оскільки довжина хвилі відсічки залежить від того, в якому середовищі знаходиться хвилевід, то, коли помістити його на межу розділу двох середовищ, вихідний спектр матиме вигляд:

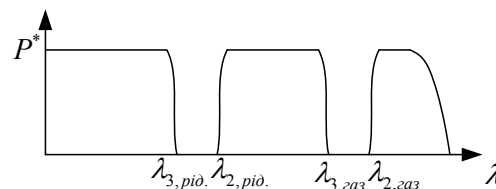


Рис. 4. Вихідний спектр чутливого елемента, що розташований на межі двох середовищ

Для розширення діапазону вимірювання рівнемір складається з кількох послідовно з'єднаних чутливих елементів (рис. 5). Параметри кожного з чутливих елементів вибираються таким чином, щоб області непропускання в них світла були різними. Це дозволяє реєструвати світловий потік, що проходить послідовно через усі чутливі елементи, і відокремлювати оптичну інформацію від кожного з них. Тому, з'єднавши послідовно n хвилеводів таким чином, щоб кожний хвилевід мав свій унікальний діапазон $\lambda_{3,під} \dots \lambda_{2,газ}$, і пропускаючи через них монохромне світло, на виході отримаємо такий спектр (рис. 6).

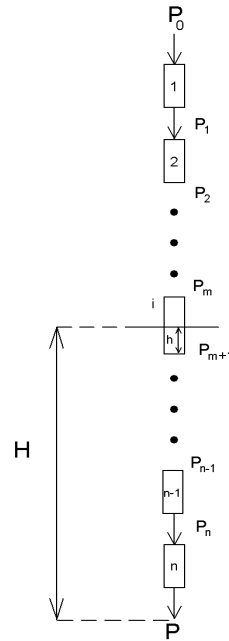


Рис. 5. Структура рівнеміра

Визначивши за вихідним спектром значення довжин хвиль $\lambda_{2, \text{рід.}}^n$ та $\lambda_{2, \text{газ.}}^1$, за формулою (8) визначаються відповідно ПЗ рідини та газу, які підставляються в характеристичне рівняння для визначення α та α' . Знаючи з отриманого спектра номер датчика i , який знаходиться на межі розділу двох середовищ, визначаємо дійсний рівень рідини.

Розрахунок потужностей усього рівнеміра, з урахуванням того, що показники заломлення елементів, котрі знаходяться в різних середовищах, будуть різними, має вигляд:

$$P_m = P_o \cdot e^{-2mL\alpha_1}, \quad (9)$$

$$P = P_{m+1} \cdot e^{-2(n-(m+1))L\alpha_2} \quad (10)$$

Звідки

$$P_{m+1} = \frac{P}{e^{-2(n-(m+1))L\alpha_2}}, \quad (11)$$

де m – кількість чутливих елементів у газоподібному середовищі, n – загальна кількість чутливих елементів, з яких складається рівнемір.

З урахуванням формули (3) рівняння перетворення набуде вигляду:

$$h = \frac{\ln\left(\frac{P_m}{P_{m+1}}\right) + 2L\alpha_2}{2(\alpha_2 - \alpha_1)}. \quad (12)$$

Загальний рівень рідини в резервуарі розраховується за формулою:

$$H = L \cdot (n - (m + 1)) + h \quad (13)$$

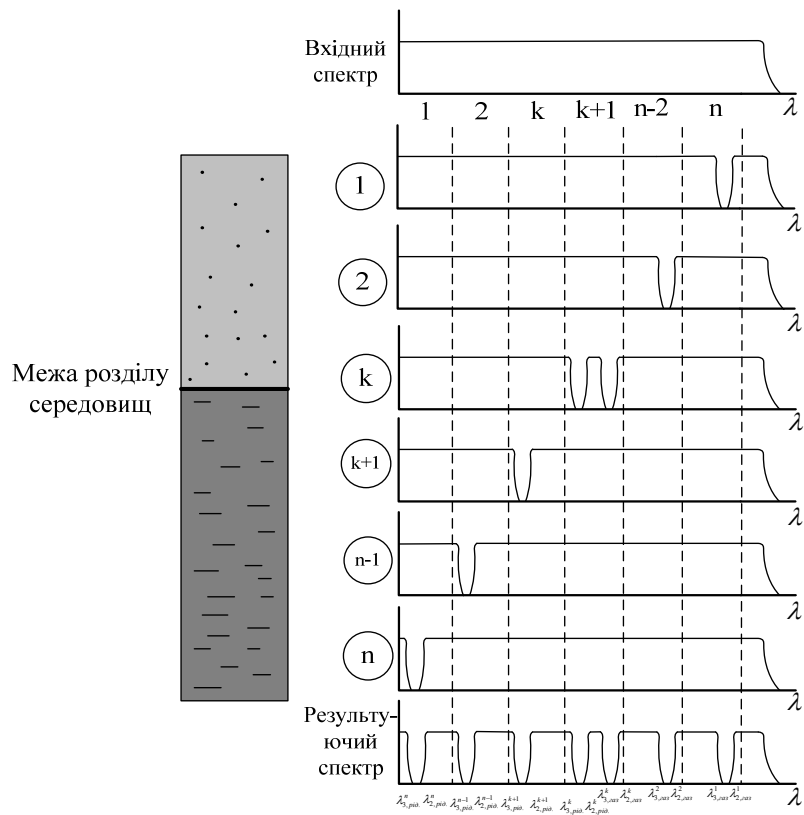


Рис. 6. Результуючий спектр рівнеміра

Висновки. Запропоновано оптичний вимірювальний перетворювач рівня рідини, чутливі елементи якого виконано з діелектрика з від’ємним показником заломлення. У результаті дослідження було підвищено точність приладу за рахунок усунення впливу температури й тиску на оптичні властивості матеріалів хвилеводу та зовнішніх середовищ, розширено діапазон вимірювальної величини за рахунок збільшення кількості чутливих елементів і підвищено його чутливість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Optical tank–level gauge. United States Patent Application / Clark, Reece R. – №20020047760; publ. 25.04.2002.
2. High accuracy liquid level meter based on pulsed time of flight principle. United States Patent Application / Kari Matta, Juha Kostamovaara. – №36020567729; publ. 15.05.2004.
3. Довгалець С. Керування світлопропусканням тришарових оптичних хвилеводів / Сергій Довгалець, Анатолій Васюра // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2001. – № 1. – С. 270 – 277.
4. Shadrivov I. V. Guided modes in negative-refractive-index waveguides / I. V. Shadrivov, A. A. Sukhorukov, Y. S. Kivshar // Physical Review E. – 2003. – Vol. 3, № 67. – P. 10 – 14.
5. Довгалець С. М. Рефрактометричні вимірювання з використанням оптичних хвилеводів із від’ємним показником заломлення / С. М. Довгалець, А. Ф. Хомчук, П. А. Хомчук // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – № 1 (9). – С. 56 – 60.

Кучерук Володимир Юрійович – д. т. н., професор кафедри метрології і промислової автоматики.

Довгалець Сергій Михайлович – к. т. н., доцент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки.

Борщова Ірина Петрівна – студент кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки.

Хомчук Петро Анатолійович – магістрант кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки.

Вінницький національний технічний університет.