

МОДЕЛІ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РЕФРАКТОМЕТРІВ НА ОСНОВІ ПРОЗОРИХ ПОРОЖНИСТИХ ЦИЛІНДРІВ

Теленик С.Ф., Гришко В.Ф., Долина В.Г.

Вступ

У наш час проблема комплексної автоматизації у різних галузях народного господарства є однією з ключових. Її вирішення відноситься до одного з пріоритетних напрямків науково-технічної політики у всьому світі. Розв'язання цієї проблеми нерозривно пов'язане з розробкою принципово нових вимірювальних систем і комплексів, що базуються на сучасних досягненнях науки і техніки, які використовують нові способи одержання інформації. Одним із найважливіших параметрів технологічних процесів у багатьох галузях народного господарства є вміст сухих речовин у рідких продуктах.

Для визначення вмісту сухих речовин найбільше розповсюдження отримали оптичні прилади, зокрема рефрактометри, які відзначаються високою точністю у порівнянні з вібраційними, ультразвуковими, поплавковими та іншими засобами. Але можливості створення автоматичних рефрактометрів для визначення вмісту сухих речовин у рідких продуктах за традиційною схемою з використанням оптичних призм обмежені умовами переробки рідких продуктів, які призводять до швидкого забруднення чутливих елементів - призм. Конструктивні особливості первинних перетворювачів на основі призм не дозволяють швидко та ефективно їх промивати. Цих недоліків позбавлені первинні перетворювачі на основі прозорих циліндричних елементів [1], які можуть бути легко підключені до магістралі з рідиною, що промиває. Крім того, собівартість первинних перетворювачів на основі прозорих порожнистих циліндрів у кілька разів нижча від собівартості первинних перетворювачів на основі оптичних призм.

Для забезпечення серійного впровадження автоматичних рефрактометрів на основі прозорих циліндричних елементів необхідно провести фундаментальні дослідження.

Визначення проблеми

Для проведення досліджень необхідно розробити математичну модель первинного перетворювача, яка б відображала залежність проходження світла від показника заломлення рідини, що вимірюється. Розроблену модель потрібно дослідити щодо впливу різноманітних параметрів, насамперед геометричних розмірів прозорого порожнистого циліндра (ППЦ), відхилень геометричних характеристик ППЦ, взаємного розташування випромінювача, ППЦ та світлочутливого елемента, температури, прозорості рідини, фізичних властивостей ППЦ. Для цього потрібно реалізувати зазначену модель на комп'ютері.

В цій статті проводиться розробка математичної моделі первинного перетворювача, її дослідження на предмет впливу геометричних розмірів ППЦ, взаємного розташування випромінювача, ППЦ та світлочутливого елемента, деяких фізичних властивостей ППЦ.

Обґрунтування методу дослідження

Промені, що входять у порожнистий прозорий циліндричний елемент під певним кутом зазнають явища повного внутрішнього відбиття на межі внутрішньої поверхні цього елемента та вимірюваного середовища. Кути входу та виходу таких променів пов'язані між собою математичними залежностями, які включають показники заломлення циліндричного елемента, навколишнього та вимірюваного середовищ. Визначення цих залежностей дозволить встановити положення випромінювача та фотоприймача, поліпшити конструкцію первинних перетворювачів.

Для створення математичних моделей рефрактометрів на основі запропонованого способу визначення вмісту сухих речовин у рідких продуктах з використанням прозорих порожнистих елементів необхідно дослідити проходження світла через циліндричні об'єкти. Дослідження будемо проводити з використанням методів комп'ютерної оптики. Комп'ютерна оптика базується на двох основних підходах у вивченні природи світла та пов'язаних з ним процесів – це фізична та геометрична оптика [2].

На основі визначення точносних характеристик результатів досліджень проходження випромінювання через прозорі геометричні об'єкти методами фізичної та геометричної оптики, встановлено, що для більшості інженерних розрахунків доцільно використовувати закони геометричної оптики, оскільки вони забезпечують високу точність розрахунків і потребують менше часу та об'ємів пам'яті ЕОМ [3].

Розробка моделі проходження світла крізь ППЦ

Розглянемо проходження випромінювання через прозорий циліндр із рідиною. Порожнистий прозорий циліндр (ППЦ) з рідиною представлений у вигляді двох середовищ з різними показниками заломлення n_y і $n_{ж}$ відповідно.

У процесі опромінення ППЦ пучком рівнобіжних променів відбувається їхнє розсіювання. На характеристику розсіювання впливає також рідина, що знаходиться у середині ППЦ. Для вирішення задачі розподілу вихідного потоку ППЦ у просторі правомочна заміна пучка рівнобіжних променів на промінь, що сканує поперек поверхні ППЦ паралельно лінії реєстрації [4].

Проміжок відхилення променя від осі, що проходить через центр ППЦ, можна розділити на три зони:

1. $0 \leq x \leq n_{ж} \cdot a$
2. $n_{ж} \cdot a < x < n_y \cdot a$
3. $n_y \cdot a < x \leq b$

де x – координата місця входу променя в ППЦ; a – внутрішній радіус ППЦ; b – зовнішній радіус ППЦ.

Хід променів для кожної з зон показаний на рис. 1-3.

Багаторазово відбиті промені, що не роблять істотного впливу на результуючу картину розсіювання, при цьому не розглядаються. Промені першої зони зазнають заломлення чотири рази на границях двох середовищ і виходять із ППЦ під кутом θ . Визначаємо цей кут через параметри ППЦ і місце входу променя x .

Кут θ_1 визначається через кути падіння і заломлення за допомогою наступного рівняння:

$$\theta = -\alpha_7 + \alpha_6 - \alpha_5 + \alpha_4 + \alpha_3 - \alpha_2 + \alpha_1 - \alpha_0 \quad (1)$$

З огляду на рівність кутів $\alpha_0 = \alpha_7$, $\alpha_1 = \alpha_6$, $\alpha_2 = \alpha_5$, $\alpha_3 = \alpha_4$ рівняння (1) запишемо в наступному вигляді:

$$\theta = 2(\alpha_3 - \alpha_2 + \alpha_1 - \alpha_0) \quad (2)$$

Визначимо кути α_0 , α_1 , α_2 , α_3 через параметри ППЦ і рідини, а також координату x :

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{x}{b} \quad (3)$$

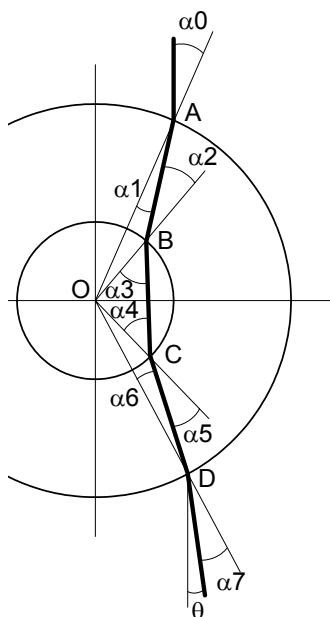


Рис. 1. Хід променів для зони

1. $0 \leq x \leq n_{жс} \cdot a$.

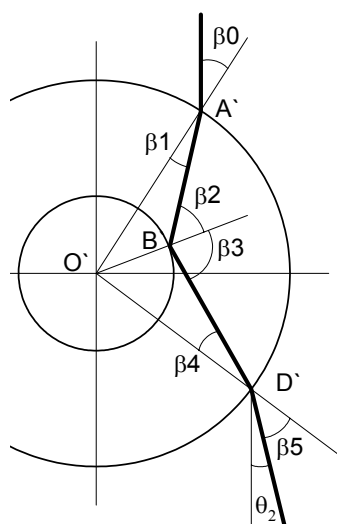


Рис. 2. Хід променів для зони

2. $n_{жс} \cdot a < x < n_{ч} \cdot a$.

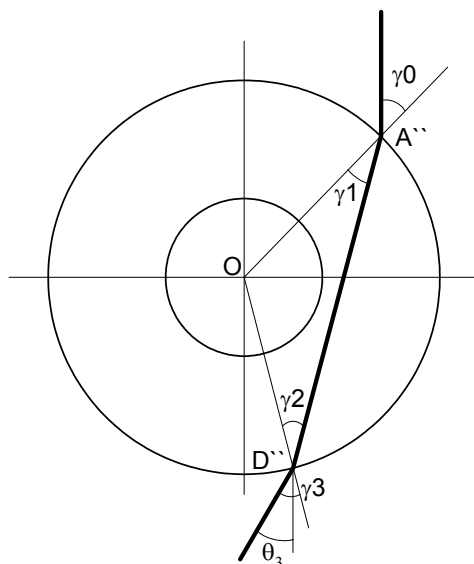


Рис. 3. Хід променів для зони 3. $n_{ч} \cdot a < x \leq b$.

Відповідно до рис. 1, кут α_1 знаходимо з закону заломлення променя на межі двох середовищ:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} = n_{ч} \quad (4)$$

Підставляючи в (4) значення α_0 і вирішуючи його відносно α_1 , одержимо:

$$\alpha_1 = \frac{\arcsin(x)}{n_{чм} \cdot b} \quad (5)$$

З метою визначення кута α_2 розглянемо ΔOAB (рис. 1). У ньому маютья дві відомі сторони $OA=b$, $OB=a$, а також кут α_1 . Відповідно до теореми синусів запишемо:

$$\frac{b}{\sin(180^\circ - \alpha_2)} = \frac{a}{\sin(\alpha_1)} \quad (6)$$

Вирішуємо (6) відносно α_2 :

$$\alpha_2 = \arcsin\left(\frac{x}{n_y \cdot a}\right) \quad (7)$$

знаходимо за законом Снеллія:

$$\frac{\sin(\alpha_2)}{\sin(\alpha_3)} = \frac{n_{жс}}{n_y} \quad (8)$$

вирішуємо щодо невідомого кута α_3 :

$$\alpha_3 = \arcsin\left(\frac{x}{n_{жс} \cdot a}\right) \quad (9)$$

Підставляючи (3),(5),(7),(9) знаходимо кут θ_1 через параметри ППЦ, рідини і координату місця входу променя:

$$\theta_1 = 2 \cdot \left(\arcsin\left(\frac{x}{n_{жс} \cdot a}\right) - \arcsin\left(\frac{x}{n_y \cdot a}\right) + \arcsin\left(\frac{x}{n_y \cdot b}\right) - \arcsin\left(\frac{x}{b}\right) \right) \quad (10)$$

Промені, що входять у ППЦ у другій зоні, двічі зазнають за час проходження ППЦ заломлення і один раз відбиття від внутрішньої стінки ППЦ. Кути θ_2 (рис. 2), під якими промені виходять із ППЦ, визначаються через кути падіння, заломлення і відбиття в такий спосіб:

$$\theta = 180 - \beta_5 + \beta_4 - \beta_3 - \beta_2 + \beta_1 - \beta_0 \quad (11)$$

З огляду на рівність кутів $\beta_5 = \beta_0$, $\beta_4 = \beta_1$, $\beta_3 = \beta_2$, рівняння (11) запишемо у виді:

$$\theta_2 = 2(90 - \beta_2 + \beta_1 - \beta_0) \quad (12)$$

Визначимо кути β_0 , β_1 , β_2 через координати входу променя, параметри ППЦ і рідини:

$$\beta_0 = \arcsin \frac{x}{b} \quad (13)$$

Відповідно до закону Снеллія [4] запишемо:

$$\frac{\sin \beta_0}{\sin \beta_1} = n_y \quad (14)$$

Вирішуємо (14) відносно β_1 :

$$\beta_1 = \arcsin \frac{\sin \beta_0}{n_{жс}} = \arcsin \frac{x}{n_y \cdot b} \quad (15)$$

З $\Delta D'A'B'$ відповідно до теореми синусів запишемо:

$$\frac{b}{\sin(180^\circ - \beta_2)} = \frac{a}{\sin \beta_1} \quad (16)$$

Вирішуємо (16) відносно β_2 :

$$\beta_2 = \arcsin \frac{b \cdot \sin \beta_1}{a} = \arcsin \frac{x}{n_y \cdot a} \quad (17)$$

Підставляємо значення через параметри ППЦ і координату місця входу x , кутів з (13), (4),(7) у формулу (12):

$$\theta_2 = 2 \cdot \left(90^\circ - \arcsin \frac{x}{n_y \cdot a} + \arcsin \frac{x}{n_y \cdot b} - \arcsin \frac{x}{b} \right) \quad (18)$$

Рівняння (18) характеризує кути відхилення θ_2 променів, що вийшли з ППЦ у другій зоні, через параметри ППЦ і координати місця входу променів x .

На рис. 3 показана траєкторія променя, що входить у ППЦ у третій зоні. Промені цієї зони проходять ППЦ, не торкаючись внутрішньої стінки і рідкого середовища, що досліджується. Визначимо кут θ_3 через кути падіння і заломлення:

$$\theta_3 = \gamma_3 - \gamma_2 - \gamma_1 + \gamma_0 \quad (19)$$

З огляду на рівність кутів $\gamma_0 = \gamma_3$, $\gamma_2 = \gamma_1$, запишемо:

$$\theta_3 = 2(\gamma_0 - \gamma_1) \quad (20)$$

Визначаючи кути γ_1 і γ_0 через параметри ППЦ і місце входу променя, одержимо:

$$\theta_3 = 2 \cdot (\arcsin \frac{x}{b} - \arcsin \frac{x}{n_u \cdot b}) \quad (21)$$

Кути θ_1 , обумовлені (21), характеризують відхилення променів, що входять у ППЦ у третій зоні.

Використовуючи формули (10), (18) і (21), побудовані графіки, що характеризують залежності між кутами $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ і координатами місць входу променів (рис. 4). При цьому $a = \text{const}, b = \text{const}, n_u = \text{const}$. Значення $n_{ж1}, n_{ж2}$ і $n_{ж3}$ також обрані фіксованими і характеризують криві 1, 2 і 3.

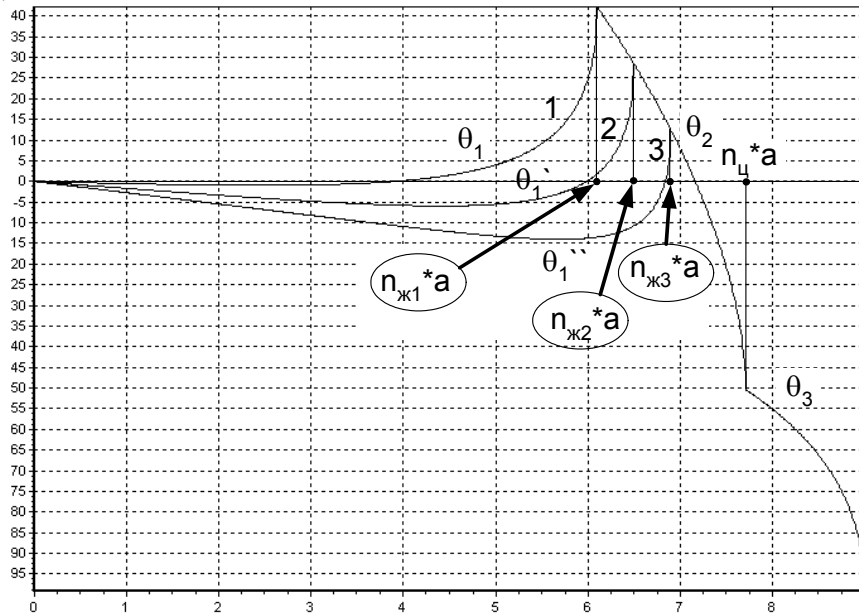


Рис. 4. Залежності $\theta(x)$ при різних $n_{ж}$

На рис. 4 добре помітні три характерні криві. Крива θ_1 характеризує зону проходження променів через досліджувану рідину, θ_2 – зону повного внутрішнього відбиття і θ_3 – зону проходження через стінки ППЦ. Крім того, зі збільшенням показника заломлення рідини зона повного внутрішнього відбиття зменшується.

У такий спосіб проведено дослідження проходження пучка рівнобіжних променів через ППЦ, яке показало, що кути відхилення $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ розділяються в залежності від місця входу променя x .

Отримано математичні залежності між кутами відхилення променів $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, оптико-геометричними параметрами ППЦ, координатою входу променя x і показником заломлення досліджуваної рідини.

Визначення передавальної характеристики первинного перетворювача

З метою визначення передавальної характеристики первинного перетворювача концентрації розчинів розглянемо хід променів через вимірювальний елемент первинного перетворювача, показаний на рис. 5.

Відповідно до рівняння (8) граничний кут виходу променів із прозорого циліндричного об'єкту, що зазнали явище повного внутрішнього відбиття за умови $x_i = a \cdot n_{ж}$, характеризує положення фронту потоку світла, що попадає на фотоприймач, світлочутливий шар якого розташований у площині, яка проходить через пряму BD та перпендикулярна осі ОС. У загальному випадку пряма BD розташована під кутом $90^\circ - \beta$ щодо осі виміру АВ, яка перетинає вісь прозорого циліндричного об'єкту.

Визначимо математичну залежність між положенням фронту світлових променів F_{oi} відносно початку відліку фотоприймача і показником заломлення вимірюваної рідини $n_{ж}$.

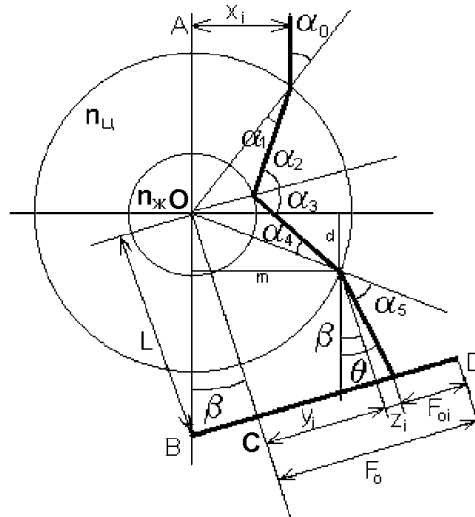


Рис. 5. Хід променів у первинному перетворювачі

Якщо розміри світлочутливого шару прийняти рівним F_0 , кінець світлочутливої лінійки розмістити в місці підстави перпендикуляра, що опущений з центру циліндричного об'єкту на вісь BD , то можна записати рівняння:

$$F_{oi} = F_0 - F_i = F_0 - y_i - z_i \quad (22)$$

де $y_i = b \cdot \sin(\alpha_0 + \theta_i - \beta)$, $z_i = (L - M_i) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i - \beta)$, L – відстань від центра циліндричного об'єкту до світлочутливого шару, $M_i = b \cdot \cos(\alpha_0 + \theta_i - \beta)$.

Приймаючи до уваги рівняння (8), залежність $x_i = a \cdot n_{ж}$, а також розташування світлочутливого шару на рис. 5, рівняння (22) запишемо у виді:

$$\begin{aligned} F_{oi} &= F_0 - b \cdot \sin\left(\theta_i + \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b}\right) - \beta\right) - \left[L - b \cdot \cos\left(\theta_i + \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b}\right) - \beta\right) \right] \cdot \operatorname{tg}(\theta_i - \beta) = \\ &= F_0 - b \cdot \sin\left(\pi - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{n_{ж}}{n_{ц}}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_{ц}}\right) - \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b}\right) - \beta\right) - \\ &- \left[L - b \cdot \cos\left(\pi - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{n_{ж}}{n_{ц}}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_{ц}}\right) - \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b}\right) - \beta\right) \right] \times \\ &\times \operatorname{tg}\left(\pi - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{n_{ж}}{n_{ц}}\right) + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_{ц}}\right) - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b}\right) - \beta\right) \end{aligned} \quad (23)$$

Останнє рівняння встановлює залежність між параметром $n_{ж}$, що вимірюється, і вихідною величиною F_{oi} , що визначає положення фронту світлового потоку, що зазнав явища повного відбиття, і дозволяє, з урахуванням геометричних розмірів оптичного датчика, обчислити їхнє необхідне положення в просторі для забезпечення функції виміру.

Комп'ютерна реалізація математичної моделі первинного перетворювача рефрактометра.

З метою дослідження передавальних характеристик первинних перетворювачів рефрактометрів на основі порожнистих прозорих циліндрів розроблена програма, написана на мові Delphi, що дозволяє емулювати роботу досліджуваного об'єкта з різними параметрами, проводити розрахунки вихідних параметрів у залежності від зміни вхідних параметрів, працювати з різними таблицями відповідності показників заломлення рідин процентному вмісту сухих речовин у розчинах, отримувати графіки результатів досліджень. Розроблена програма повинна забезпечувати розрахунок основних параметрів первинних перетворювачів рефрактометрів на основі прозорих порожнистих циліндрів за формулами (18), (23), а також визначати координати виходу променів з циліндру, що зазнали явища повного внутрішнього відбиття.

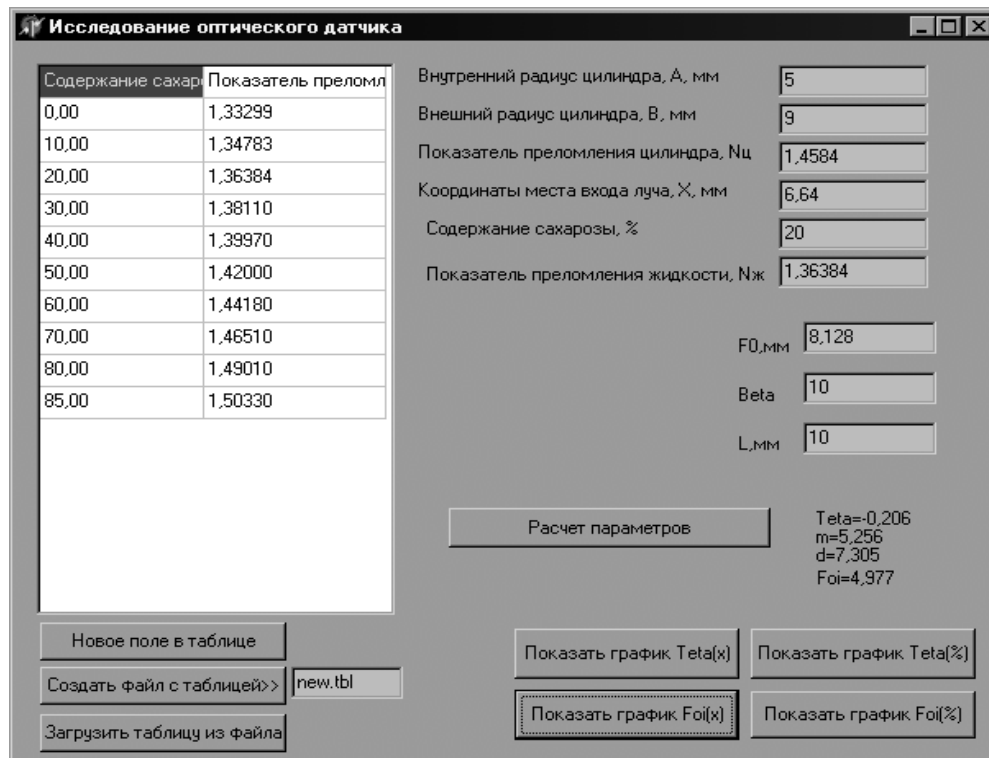


Рис.6. Вікно програми дослідження математичної моделі первинних перетворювачів рефрактометрів

При розробці програми ставилися такі завдання:

- результати програми повинні бути наочні;
- у програмі повинне бути передбачене ручне введення змінних параметрів;
- розрахунок вихідних параметрів відбувається автоматично відповідно до введених параметрів;
- можливість зміни таблиці відповідності процентного вмісту сухих речовин і показника заломлення;
- програма повинна формувати результати досліджень у вигляді графіків;
- легкість у роботі.

Вхідними параметрами є:

1. Внутрішній радіус циліндра a , мм;
2. Зовнішній радіус циліндра b , мм;
3. Відстань світлочутливої пластини від центру циліндра L , мм;
4. Довжина світлочутливої пластини F_0 , мм ;
5. Кут відхилення пластини від осі виміру β , град;
6. Процентний вміст сахарози (або іншої розчинної речовини);
7. Відстань променя освітлення від осі циліндра x , мм;
8. Показник заломлення циліндра n_c ;

Вихідними даними є:

1. Межа неосвітленого відрізка F_{oi} , мм;
2. Координати, що визначають точку виходу променів з циліндру m і d , мм;
3. Кут відхилення променя на виході з циліндру θ , град.

Для одержання передавальної характеристики первинного перетворювача концентрації розчинів введемо чисельні значення параметрів цього первинного перетворювача $a=5$ мм, $b=9$ мм, $L=10$ мм, $F_0 = 8.128$ мм, $\beta=10^\circ$ і визначимо функцію $F_{oi}=f(n_{жi})$ для декількох

значень $n_{ц}$, відповідно до складеної програми. За результатами проведених розрахунків побудуємо графік на рис. 7.

Побудований графік характеризується не лінійністю, максимальне відносне значення якої в діапазоні 1.3329 до 1.4584 не перевищує 11%.

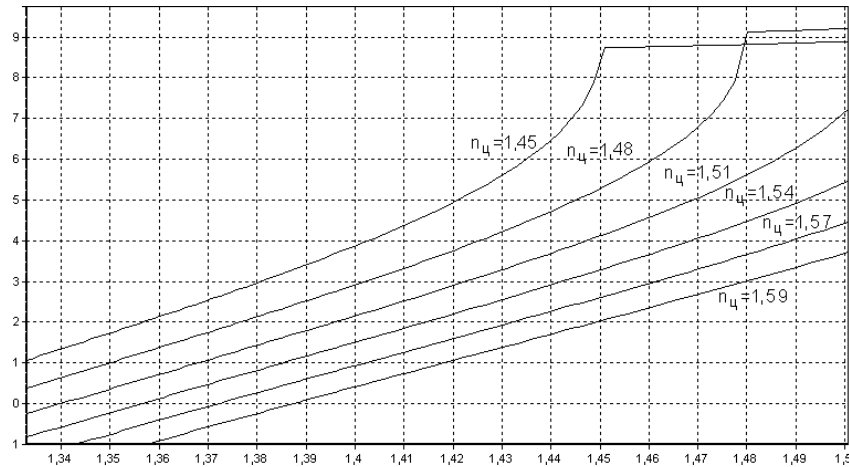


Рис. 7. Графік залежності F_{oi} від $n_{ж}$.

Для зменшення похибки, обумовленої не лінійністю характеристики перетворення, може бути використаний, наприклад, метод кусочно-лінійної апроксимації. Відомо, що для зменшення цього виду похибки весь діапазон виміру вхідної величини необхідно розбити на піддіапазони, число яких визначається залежністю:

$$m = \sqrt{\frac{A_n}{A_{nn}}}, \quad (24)$$

де A_{nn} і A_n – абсолютні похибки, обумовлені відповідно не лінійністю кожного з піддіапазонів і повного діапазону виміру вхідної величини, m – число ділянок кусочно-лінійної апроксимації. Тому, при поділі діапазону виміру на 10 ділянок, з похибкою, що не перевищує задану, усередині ділянки функції перетворення можна вважати лінійними. Крім того, графік на рис.7 може бути описаний функцією:

$$F_{oi} = A + B \cdot n_{жi} + C \cdot n_{жi}^2 \quad (25)$$

де A, B, C – постійні коефіцієнти квадратного полінома, що розраховуються рішенням системи рівнянь:

$$\begin{aligned} F_{oi} &= A + B \cdot n_{ж1} + C \cdot n_{ж1}^2 \\ F_{oi} &= A + B \cdot n_{ж2} + C \cdot n_{ж2}^2 \\ F_{oi} &= A + B \cdot n_{ж3} + C \cdot n_{ж3}^2 \end{aligned} \quad (26)$$

де $n_{ж1}, n_{ж2}, n_{ж3}$ – значення показників заломлення досліджуваної рідини на початку, середині і кінці діапазону виміру.

Фотоприймач у виді оптоелектронного перетворювача здійснює перетворення геометричного положення фронту світлового потоку в інтервал часу T_i , так що:

$$T_i = K_{оэн} \cdot F_{oi} \quad (27)$$

При заповненні інтервалу часу T_i лічильними імпульсами частотою f_0 на виході первинного перетворювача одержуємо кількість імпульсів:

$$N_i = T_i \cdot f_0 = K_{оэн} \cdot F_{oi} \cdot f_0 \quad (28)$$

З урахуванням останньої рівності характеристика перетворення первинного перетворювача датчика концентрації розчинів приймає вид:

$$N_i = K_{оэн} \cdot f_0 (A + B \cdot n_{жi} + C \cdot n_{жi}^2) \quad (29)$$

На практиці віддають перевагу кусочно-лінійній апроксимації з розбивкою діапазону виміру на m ділянок і лінійним представленням інформації у межах проміжного діапазону.

Розроблена математична модель первинного перетворювача вмісту сухих речовин у рідких продуктах, рівняння (23), дозволила встановити, що лінійність передавальної характеристики залежить зокрема від матеріалу циліндричного чутливого елемента та кута β , під яким розміщено чутливий шар фотоприймача по відношенню до осі вимірювання. Для порівняння наведені характеристики перетворення для кутів $\beta_1 = -30^\circ$, $\beta_2 = 0$ та $\beta_3 = 30^\circ$ на рис. 8 для чутливого елемента з сіталлу ($n_{\text{д}}=1,5447$). Різні матеріали мають різні показники заломлення, що може бути використано для підвищення точності вимірювання.

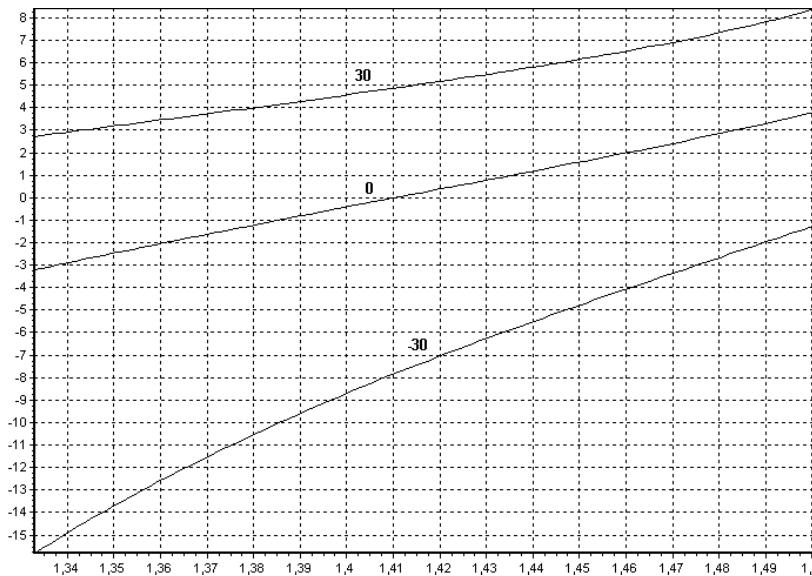


Рис. 8. Графіки залежності FoI від $n_{\text{ж}}$ при різних значеннях кута β .

Для графічного аналізу доцільного розташування світлочутливої частини первинного перетворювача по відношенню до чутливого елемента необхідно розрахувати координати місця виходу з ППЦ променів, що зазнали явища повного внутрішнього відбиття (рис.5), за формулами:

$$d = b \cdot \cos(\alpha_0 + \theta_i) \tag{30}$$

$$m = b \cdot \sin(\alpha_0 + \theta_i) \tag{31}$$

Останні залежності дозволяють визначити місце виходу променів з ППЦ, визначити доцільне місце розташування світлочутливого елемента та обмежити проходження променів, що не несуть інформацію про величину, що вимірюється.

Дослідження математичних моделей первинних перетворювачів для високоточних рефрактометрів

Отримані моделі первинних перетворювачів на основі прозорих циліндричних елементів (23) дозволяють провести аналіз впливу величин, що входять у ці моделі як складові елементи, на результат вимірювання, знайти способи зменшення похибок вимірювання і запропонувати шляхи створення високоточних лабораторних та автоматичних рефрактометрів.

Проведемо оцінку впливу на результати вимірювання основних параметрів: внутрішнього та зовнішнього діаметрів чутливого елемента, відхилення осі внутрішньої пове-

рхні чутливого елементу від зовнішнього та температури вимірюваної рідини, чутливого елементу та навколишнього середовища.

Основними геометричними параметрами чутливого елементу, що впливають на результати вимірювання, є внутрішній та зовнішній діаметри чутливого елементу, відхилення осі внутрішньої поверхні чутливого елементу від зовнішнього.

Для оцінки впливу внутрішнього та зовнішнього діаметрів чутливого елементу на результати вимірювання підставимо у рівняння (23) значення внутрішнього a та зовнішнього b радіусів чутливого елементу спочатку заданих, а потім отриманих у результаті виготовлення чутливого елементу. Задані розміри чутливого елементу: внутрішній радіус $a = 3,75$ мм та зовнішній радіус $b = 6,75$ мм, обрані з необхідності забезпечення умови, що $b > n_{жс} \cdot a$, а також з необхідності забезпечення вільного проходження вимірюваної величини через внутрішній об'єм чутливого елементу. Виготовлення чутливого елементу з радіусом меншим $a = 3,75$ мм ускладнює вимірювання сиропів з вмістом сухих речовин більшим 50% в наслідок збільшення їх в'язкості. Ускладнюється також проходження через чутливий елемент з меншим діаметром рідин, що містять додаткові включення, наприклад, мезгу у дифузійному соку цукрового виробництва.

На графіках рисунку 9 показані залежності вихідної величини F_{oi} від вмісту сухих речовин у вимірюваній рідині для заданих радіусів $a = 3,75$ мм та $b = 6,75$ мм (крива 1), радіусів $a = 3,65$ мм та $b = 6,65$ мм (крива 2) та радіусів $a = 3,85$ мм та $b = 6,85$ мм (крива 3).

На графіках рисунку 10 показані залежності вихідної величини F_{oi} від вмісту сухих речовин у вимірюваній рідині для заданих радіусів $a = 3,75$ мм та $b = 6,75$ мм (крива 1), радіусів $a = 3,65$ мм та $b = 6,85$ мм (крива 2) та радіусів $a = 3,85$ мм та $b = 6,65$ мм (крива 3). Випадок для кривої 3 на рис.4.2 найбільше ймовірний, тому що пов'язаний з необхідністю полірування внутрішньої та зовнішньої поверхонь чутливого елементу у процесі виготовлення.

Розглянемо вплив на результати вимірювання відхилення осі внутрішньої поверхні прозорого порожнистого циліндру від осі зовнішньої поверхні. Для цього використаємо математичну модель (1.47) та систему рівнянь (2.32).

На рисунку 11 наведено графік залежності вихідної величини первинного перетворювача рефрактометрів від відхилення осі внутрішньої поверхні чутливого елементу від осі зовнішньої поверхні для значень відхилення осей $\Delta x = \Delta y = 0,05$ мм (крива 1) та $\Delta x = \Delta y = 0,1$ мм (крива 2) у Декартовій системі координат.

На рисунку 12 наведено графік залежності вихідної величини первинного перетворювача рефрактометрів від кута повороту осі внутрішньої поверхні чутливого елементу навколо осі зовнішньої поверхні для значень відхилення осей $r_1 = 0,05$ мм (крива 1) та $r_2 = 0,1$ мм (крива 2) у векторній системі координат.

З графіків на рис.9- 12 видно, що навіть незначні відхилення геометричних розмірів від номінальних, при жорстких допусках виготовлення, приводять до значних похибок вимірювання, що перевищують допустимі похибки 0,2 % ($B_{гix}$) вмісту сухих речовин. Тому треба зробити висновок про необхідність індивідуальної градировки первинних перетворювачів рефрактометрів з метою врахування похибок, що обумовлені неточністю виготовлення чутливих елементів у вигляді прозорих порожнистих циліндрів.

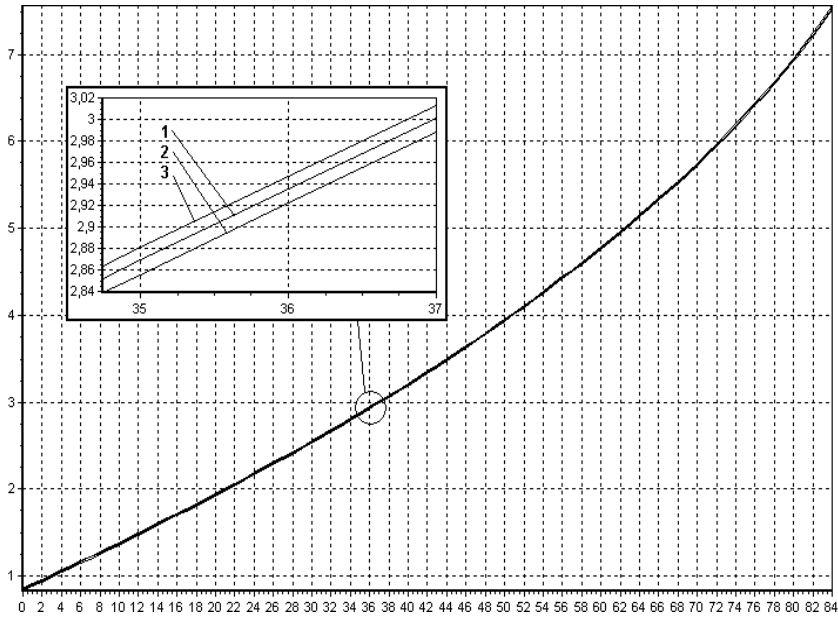


Рис. 9 Залежності вихідної величини F_{oi} від вмісту сухих речовин у вимірюваній рідині для внутрішніх та зовнішніх радіусів, що синхронно зменшуються чи збільшуються

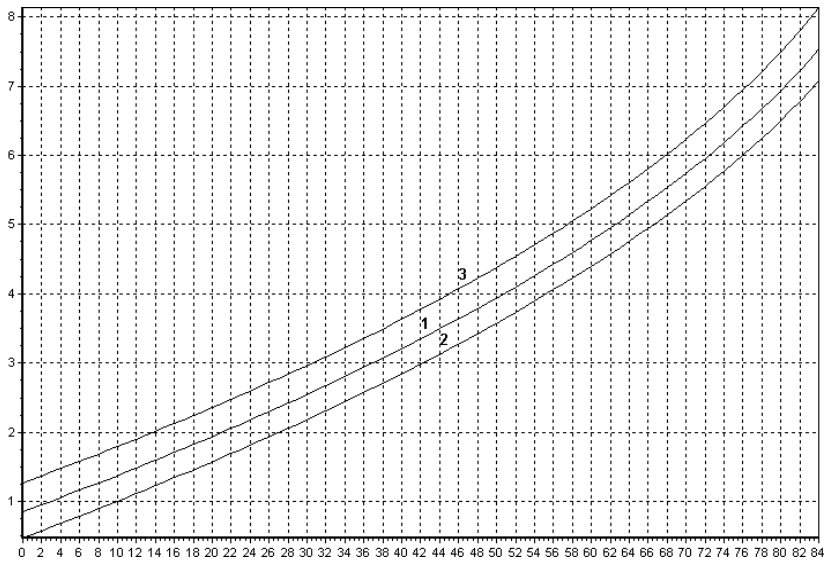


Рис. 10 Залежності вихідної величини F_{oi} від вмісту сухих речовин у вимірюваній рідині для внутрішніх та зовнішніх радіусів, що зменшуються чи збільшуються у протилежних напрямках

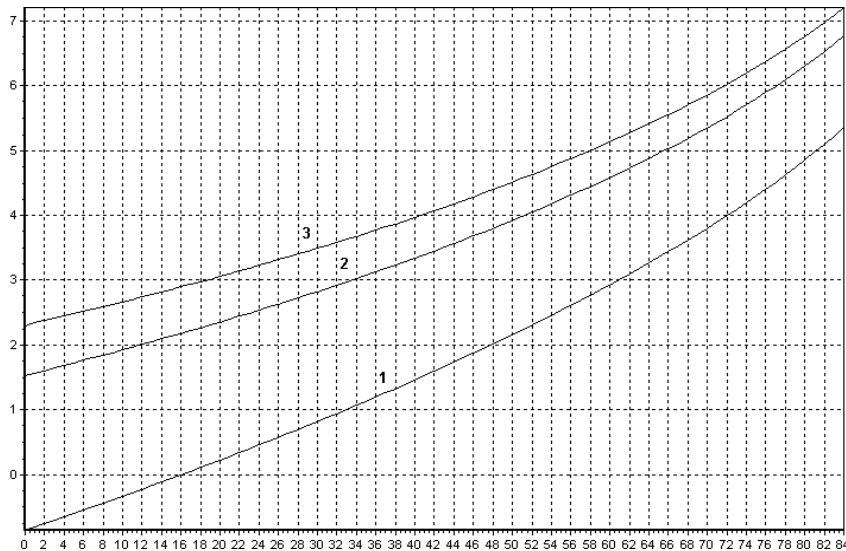


Рис. 11 Залежності вихідної величини первинного перетворювача рефрактометрів від відхилення осі внутрішньої поверхні чутливого елемента від осі зовнішньої поверхні

Математична модель первинного перетворювача (23) та рівняння (30), (31) дозволяють у процесі розробки конструкції рефрактометра розрахувати геометричне положення випромінювача та світлочутливої поверхні фотоприймача по відношенню до прозорого порожнистого циліндру.

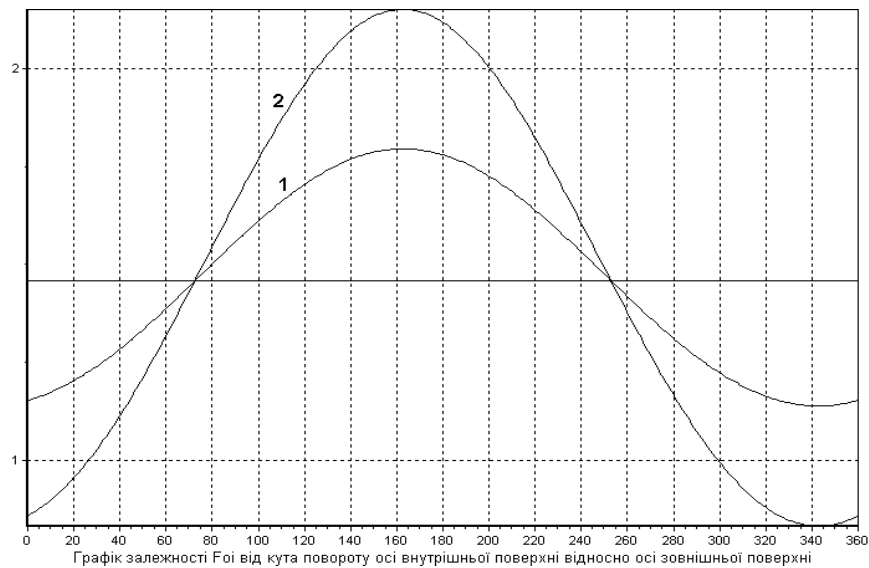


Рис. 12 Залежності вихідної величини первинного перетворювача рефрактометрів від кута повороту осі внутрішньої поверхні чутливого елемента навколо осі зовнішньої поверхні

Для оптимального розташування світлочутливої поверхні фотоприймача з точки зору максимальної чутливості та лінійності перетворення вхідної величини для конкретного матеріалу стінок циліндра з відомим показником заломлення (наприклад, для сіталлу $n_c = 1,5447$) за формулами (18), (30), (31) розраховуються відповідно кут θ , координати d і m виходу променів, що пройшли крізь циліндр з вимірюваною рідиною та зазнали явище повного внутрішнього відбиття. Знаючи траєкторію променів на виході з чутливого елемента та залежність діапазону зміни вихідної величини у залежності від вхідної (23) з урахуванням відстані L світлочутливої поверхні від центру прозорого порожнистого

циліндру, можна розрахувати положення фотоприймача по відношенню до чутливого елемента.

Мінімальна не лінійність перетворювача забезпечується вибором потрібного кута β між нормаллю до світлочутливої частини фотоприймача та віссю виміру, що перетинає вісь чутливого елемента, згідно математичної моделі (23) та графіків на рис.6.

Якщо вплив геометричних параметрів чутливого елемента первинного перетворювача може бути виявлений при виготовленні та настроюванні рефрактометрів, то вплив температури на результати вимірювання проявляється перш за все у процесі експлуатації вимірювачів показника заломлення рідин. Знати вплив температури на результати вимірювання важливо, тому що від температури залежить показник заломлення самої вимірюваної величини, показник заломлення матеріалів чутливого елемента, що приводить до зміни траєкторії променів, які несуть інформацію про вимірювану величину; від температури змінюються геометричні розміри чутливих елементів, що, як виявлено вище (графіки на рис.9 – 12), приводить до значних похибок вимірювання.

Зміна температури чутливого елемента може бути викликана зміною температури вимірюваної рідини. Зміна температури вимірюваної величини може відбуватися у широких межах – від 0 до 100°C, особливо при вимірюванні процесів, пов'язаних з випарюванням. Тому розглянемо, похибки, що виникають при контролі таких процесів. Якщо у чутливий елемент з температурою 20°C попадає рідина з температурою 80°C, то у прозорому порожньому циліндрі утворюється розподіл температури, що описується рівнянням (2.100). При такому розподілі температури похибка вимірювання розраховується за формулою (23). Результати розрахунків наведені на рисунку 13

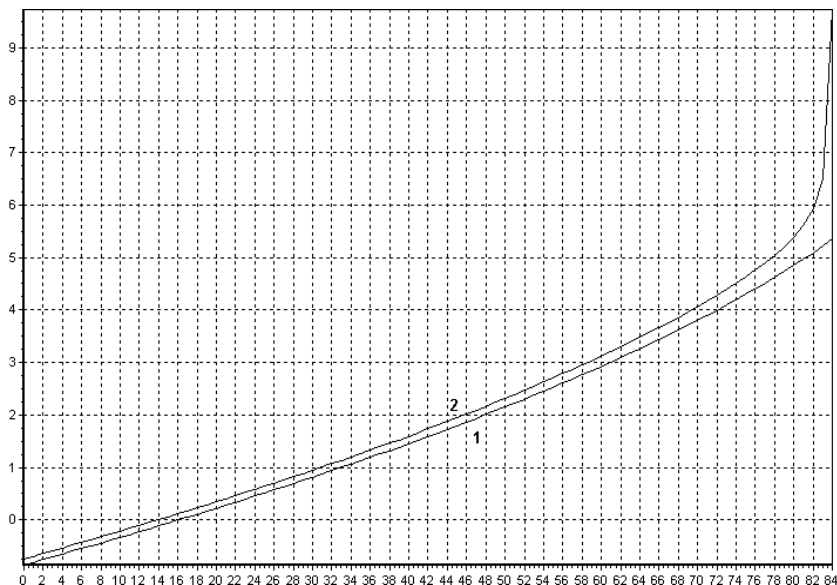


Рис. 13 Перехідні характеристики первинних перетворювачів при різних температурах внутрішньої та зовнішньої стінок чутливого елемента

Через певний проміжок часу температура чутливого елемента набирає рівномірного розподілу, при цьому значення температури залежить від багатьох факторів, основні з яких: температура, швидкість і кількість вимірюваної рідини у чутливому елементі, температура навколишнього середовища, наявність теплообмінника і охолоджуючої рідини, її температура, витрати, розміри теплообмінника, конструктивні матеріали первинного перетворювача. Тому час температурного перехідного процесу визначають експериментально. При рівномірному розподілі температури змінюється показник залом-

лення чутливого елементу та самої вимірюваної рідини. Результати розрахунку похибок вимірювання вхідної величини при зміні температури чутливого елементу для значень 30, 50, 70°C наведені на рисунку 14.

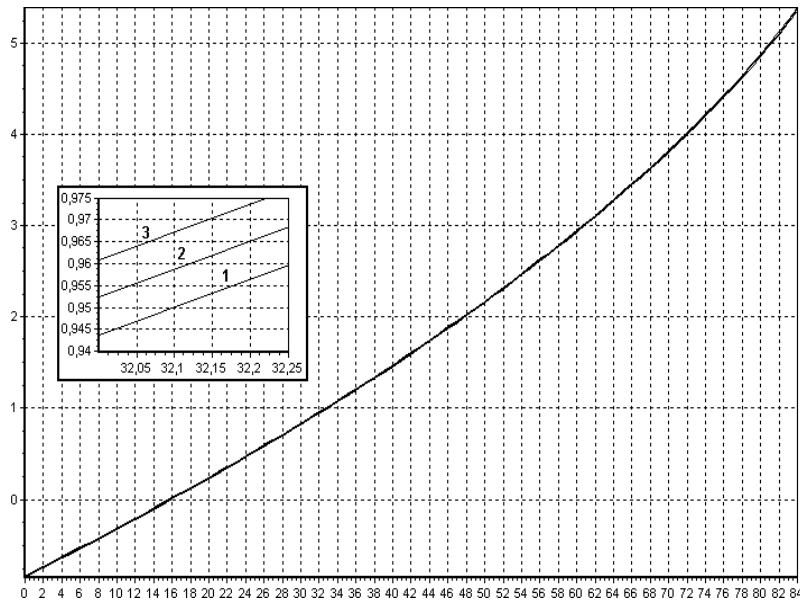


Рис. 14 Перехідні характеристики первинних перетворювачів при рівних температурах

Дослідження структурних способів зменшення похибок

Проведені вище дослідження математичних моделей первинних перетворювачів рефрактометрів показали, що у процесі експлуатації рефрактометрів в наслідок впливу дестабілізуючих факторів, перш за все температури, можуть виникати значні похибки вимірювання, не сумісні з потрібною точністю. Тому авторам були запропоновані структурні способи зменшення похибок вимірювання, які реалізовані у пристрої для вимірювання показника заломлення [6].

Зробимо оцінку ефективності запропонованих способів на основі математичної моделі первинних перетворювачів рефрактометрів (23). Запропоновані способи температурної стабілізації та регулювання струму випромінювача слід застосовувати не окремо, а сукупно, тому що вони, виконуючи окремі задачі, доповнюють один одного і забезпечують потрібну точність виміру.

Спосіб температурної стабілізації використовується тому, що дозволяє максимально зменшити вплив температури навколишнього середовища та вимірюваної рідини на точність вимірювання. Можна було обрати метод виміру температури рідини та чутливого елементу з врахуванням додаткових похибок у розрахунках кінцевого результату. Але такий підхід пов'язаний з складністю фізичної реалізації, оскільки первинний перетворювач автоматичного рефрактометра з вимірюваною рідиною являє собою динамічний об'єкт, на який впливає велика кількість дестабілізуючих факторів: температура, швидкість і кількість вимірюваної рідини у чутливому елементі, температура навколишнього середовища, температура та витрати охолоджуючої рідини, розміри теплообмінника, конструктивні матеріали первинного перетворювача. Реалізація вимірів рефрактометричним способом без залучення теплообмінника та охолоджуючої рідини не представляється можливим, оскільки вимірювана рідина з температурою 100°C не може бути підведена до первинного перетворювача, оскільки більшість електронних компонентів розраховані на температуру експлуатації не більше 85°C. При такому впливі дестабілізуючих величин у широкому діапазоні вимірювання, температура чутливого елементу буде постійно змінюватися, врахування цих змін буде ускладнене через чисельність впливових факторів.

Тому у схему вимірювача введено теплообмінник, через який протікає охолоджуюча рідина, що забезпечує певний температурний режим первинного перетворювача рефрактометра, наприклад, забезпечує температуру чутливого елементу 20°C для вимірюваних рідин з температурою, яка не перевищує 40°C, і 50°C для вимірюваних рідин з температурою від 40°C до 100°C.

Введення теплообмінника потребує певних умов його застосування. Треба використати у якості зразкової міри рідину з відомим значенням показника заломлення, наприклад, це може бути дистильована вода чи конденсат у цукровому виробництві. Конденсат може містити сліди цукру, тому слід використовувати конденсат з першої випарної установки, де поява слідів цукру мало ймовірна. Для забезпечення рівних температур зразкової міри і вимірюваної рідини потрібен певний час, тому рекомендовано ввести цикл вимірювання з терміном циклу 2 хвилини. За цей час при достатніх витратах охолоджуючої рідини (2л/хв.) і малому розході вимірюваної рідини і конденсату (0.05 л/хв.) вимоги забезпечення рівності температур будуть забезпечені. При цьому похибки від зміни температури вимірюваної рідини ($\pm 30^\circ\text{C}$) та навколишнього середовища ($\pm 25^\circ\text{C}$) будуть зменшені до похибок від зміни температури теплообмінника ($\pm 0,5^\circ\text{C}$), або в десятки разів.

Теоретичні розрахунки показали, що реалізація запропонованих способів підвищення точності за рахунок температурної стабілізації та регулювання струму випромінювача забезпечує можливість створення автоматичних рефрактометрів, похибка вимірювання яких не перевищує 0,2%, що відповідає вимогам більшості технологічних процесів.

Висновки

Таким чином отримана передавальна характеристика первинного перетворювача залежить зокрема від матеріалу циліндричного чутливого елементу, що визначає його показник заломлення, кута β , під яким розміщено чутливий шар фотоприймача по відношенню до осі вимірювання, розташування випромінювача. Також слід відмітити, що для підвищення лінійності передавальної характеристики слід використовувати матеріали ППЦ з більшим показником заломлення. Це в свою чергу дозволить розширювати можливості вимірювання складу речовин завдяки розширенню діапазону прийнятних значень показника заломлення рідини, що вимірюється.

Отримана математична модель дозволяє досліджувати вплив на показники точності рефрактометрів наступних чинників: геометричні розміри ППЦ, положення випромінювача та положення світлочутливого елементу, що також дозволяє визначати оптимальні розміри ППЦ та взаємне розташування елементів первинного перетворювача. Розроблена модель дає можливість створити серійні автоматичні рефрактометри.

Для підвищення точності вимірювання складу речовин необхідно також провести дослідження щодо впливу відхилень геометричних характеристик ППЦ, температури, прозорості рідини.

A new method of creation of primary transformers of refractometers is offered on the basis of transparent hollow cylinders. Developed mathematical model of passing of light through the transparent hollow cylinder filled with a liquid. Certain transmission description of primary transformer of refractometer and basic factors which influence on her.

1. Патент України № 6711, МКІ G01N21/41, Спосіб вимірювання показника заломлення/В.Ф. Гришко, Ю.А.Попадюха, С.Д.Хомук та ін. (Україна). – Заявлено 09.09.92; Опубл. 29.12.94. Офіц. бюл. № 8-1// Промислова власність. – 1994. - № 8-1.
2. Маркузе Д. Оптические волноводы. - М.: Мир, 1974, 576 с.
3. ЛазаревЛ.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.

4. Smithgall D.H. Light scattering model for the determination of fiber location in silicone coatings. *Applied Opt.*, 1982, v.21, №7, p.1326-1331.
5. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. — 3-е изд., испр. и доп. — М: Высш. школа, 1980. — 469 с.
6. Патент України № 66630, МКІ G01N21/41, Пристрій для виміру показника заломлення/В.Ф. Гришко, В.Г. Долина. (Україна). — Заявлено 13.08.03; Опубл. 17.05.04. Бюл. № 5, 2004 р.