

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 543.082/.084

ВИМІРЮВАЧІ ВМІСТУ СУХИХ РЕЧОВИН І КОНЦЕНТРАЦІЇ РІДКИХ ПРОДУКТІВ З ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Гришко В.Ф., Долина В.Г., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Описані нові оптичні вимірювачі вмісту сухих речовин у рідких продуктах і концентрації розчинів з діелектричними властивостями. Запропоновані математичні моделі первинних перетворювачів автоматичних рефрактометрів та діелектрометричних комірок на основі прозорих порожнистих циліндрів

Вступ

Вдосконалення технології переробки, підвищення якості продуктів тісно пов'язані з розвитком аналітичного приладобудування. У теперішній час головна мета – розробка принципово нових вимірювальних датчиків, систем та комплексів, що базуються на новітніх досягненнях науки і техніки, які використовують якісно нові принципи перетворювання.

У широкій номенклатурі засобів аналітичного контролю значне місце займають датчики вмісту сухих речовин у рідких продуктах, які дають основну інформацію про склад та якість продукції.

В цукровому виробництві одними з найважливіших параметрів, точність і оперативність визначення яких впливають на ефективність ведення технологічного процесу, є чистота цукрових розчинів, що визначається відношенням вмісту цукру (концентрації цукрового розчину) до загального вмісту сухих речовин у рідинах.

Визначення зазначених величин здійснюється, як правило, у лабораторних умовах за допомогою рефрактометрів та поляриметрів [1]. Ці засоби контролю мають суттєві недоліки, пов'язані з необхідністю ретельної підготовки відібраних проб до вимірів та невизначеністю границі світла і тіні у оптичних перетворювачах. В умовах автоматизації технологічних процесів цукрового виробництва актуальним є створення автоматичних вимірювачів вмісту сухих речовин і концентрації рідких продуктів на основі нових принципів і методів перетворювання зазначених фізичних величин.

Постановка задачі

Специфіка розробки засобів аналізу вмісту сухих речовин у рідинах та їх чистоти визначається рядом особливостей цієї області вимірювальної техніки. До їх числа належить висока температура вимірюваних рідин, що відрізняються

своїми фізико-хімічними властивостями, а також широкий діапазон змін параметрів стану вимірюваної рідини (тиск, ступінь забруднення, в'язкість тощо).

До специфічних вимог необхідно віднести різноманітність умов експлуатації вимірювальних засобів та широку номенклатуру харчових продуктів, що підлягають вимірюванням. До них відносяться: клітинний сік, дифузійний сік, соки 1 та 2 сатурацій, сироп, меляса - у цукровому виробництві; соки, джеми, пасти, сиропи - при консервації; молочні продукти, лікоро-горілчані та безалкогольні напої.

Слід відзначити жорсткі вимоги до правильності показань датчиків у процесі переробки рідких харчових продуктів. За технологічними умовами, наприклад, у процесі виготовлення вина похибка вимірювання вмісту цукру у вині не повинна перевищувати 0,15%, а при уварюванні солоду для виготовлення пива похибка вимірювання не повинна перевищувати 0,1%. Остання вимога пов'язана з тим, що 0,1% солоду при уварюванні відповідає 16 кг зерна при підготовці солоду.

Для визначення вмісту сухих речовин найбільше розповсюдження отримали оптичні прилади, зокрема рефрактометри, які відзначаються високою точністю у порівнянні з вібраційними, ультразвуковими, поплавковими та іншими датчиками [1, 2]. Але можливості створення датчиків вмісту сухих речовин на основі рефрактометрів 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 скляних циліндричних трубок, які можуть бути легко підключені до магістралі з рідиною для промивання чутливого елемента. Крім того собівартість первинних перетворювачів на основі скляних трубок у кілька разів нижча від собівартості первинних перетворювачів на основі оптичних призм.

У зв'язку з вище наданим постала задача проведення досліджень фізичних основ первинних перетворювачів на базі прозорих циліндричних об'єктів, розробки нових методів та способів підвищення точності та надійності датчиків, призначених для визначення вмісту сухих речовин у рідких продуктах та чистоти цукрових розчинів, розробки принципів створення первинних перетворювачів модульного типу для високоточних датчиків, дослідження структурних методів зменшення похибок датчиків з урахуванням особливостей умов та вимог технологічних процесів, виготовлення зразків датчиків вмісту сухих речовин у рідких продуктах та чистоти цукрових розчинів, проведення лабораторних та натурних випробувань.

Розробка вимірювачів вмісту сухих речовин у рідких продуктах

Для створення математичних моделей рефрактометрів на основі запропонованого способу визначення вмісту сухих речовин у рідких продуктах з використанням прозорих порожнистих циліндрів [3] були проведені теоретичні та екс-

периментальні дослідження проходження оптичного випромінювання через циліндричні елементи.

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 усередині 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]. Визначення передавальної характеристики первинного перетворювача концентрації розчинів здійснювалось з урахуванням трьох основних зон проходження рівнобіжних променів через ППЦ:

$$1. 0 \leq x \leq n_{ae} \cdot a$$

$$2. n_{ж} \cdot a < x < n_y \cdot a$$

$$3. n_y \cdot a < x \leq b$$

де x – координата місця входу променя в ППЦ відносно осі, що проходить через центр ППЦ, a і b – внутрішній і зовнішній радіуси ППЦ відповідно.

Промені першої зони проходять через дві стінки циліндру і вимірювану рідини, промені другої зони зазнають явища повного внутрішнього відбиття (рис.1), промені третьої зони проходять крізь стінки ППЦ не торкаючись внутрішньої стінки ППЦ.

Згідно з рис. 1 отримані математичні моделі первинних перетворювачів рефрактметрів на основі ППЦ [5]:

$$\begin{aligned} F_{oi} &= F_0 - b \cdot \sin(\theta_i + \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b} - \beta) - \\ &- \left[L - b \cdot \cos(\theta_i + \arcsin \left(\frac{a \cdot n_{ж}}{b} \right) - \beta \right] \cdot \operatorname{tg}(\theta_i - \beta) = \\ &= F_0 - b \cdot \sin \left(\pi - 2 \cdot \arcsin \frac{n_{ж}}{n_y} + 2 \cdot \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_y} - \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b} - \beta \right) - \\ &- \left[L - b \cdot \cos \left(\pi - 2 \cdot \arcsin \frac{n_{ж}}{n_y} + 2 \cdot \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_y} - \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b} - \beta \right) \right] \times \\ &\times \operatorname{tg} \left(\pi - 2 \cdot \arcsin \frac{n_{ж}}{n_y} + 2 \cdot \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b \cdot n_y} - 2 \cdot \arcsin \frac{a \cdot n_{ж}}{b} - \beta \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де F_0 – довжина лінійного фотоприймача, початок якого розміщений у точці D , θ_i – кут виходу променя, що пройшов крізь ППЦ, відносно лінії вимірювання, β – кут нахилу площини чутливої частини лінійного фотоприймача відносно лінії вимірювання, L – відстань площини чутливої частини лінійного фотоприймача від центральної осі ППЦ.

Місце виходу променя, що пройшов крізь ППЦ та зазнав явища повного внутрішнього відбиття, визначається співвідношеннями:

$$d = b \cdot \cos(\alpha_0 + \theta_i) \quad (2)$$

та

$$m = b \cdot \sin(\alpha_0 + \theta_i), \quad (3)$$

де α_0 – кут входу променя, паралельного лінії вимірювання, у ППЦ.

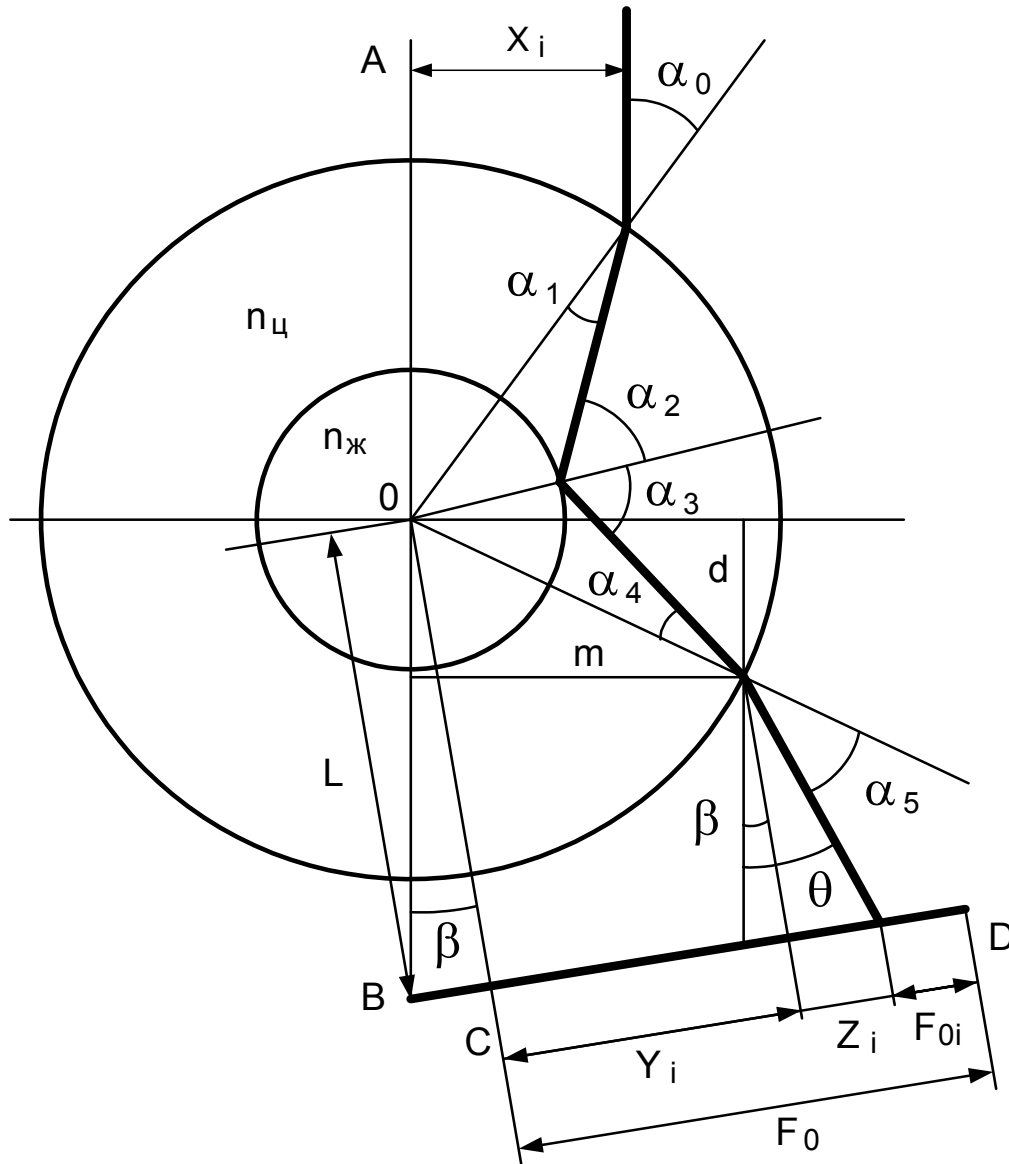


Рисунок 1 – Хід променів у первинному перетворювачі показника заломлення рідини

Математична модель (1) дозволяє визначити як конструктивні параметри первинного перетворювача показника заломлення, або вмісту сухих речовин рідини, (оптимальне розташування випромінювача світла та лінійного фотоприймача, геометричні розміри та матеріал ППЦ), так і розраховувати можливі похибки вимірювання внаслідок впливу температури навколишнього середо-

вища і вимірюваної рідини, забруднення внутрішньої поверхні чутливого елемента і т.п. Наприклад, на рис. 2 наведені залежності передаточної характеристики первинного перетворювача (залежності положення границі променів, що зазнали явища повного внутрішнього відбиття, у міліметрах від показника заломлення вимірюваної рідини) для різних кутів положення чутливої частини лінійного фотоприймача відносно лінії вимірювання. З рисунку 2 видно, що відповідним розташуванням фотоприймача можна забезпечити передаточну характеристику близьку до лінійної.

Дослідження математичної моделі (1) дозволили запропонувати нові структурні способи зменшення похибок вимірювання, зумовлені впливом температури, забруднення внутрішньої поверхні чутливого елемента, зміни випромінюючої спроможності джерела випромінювання та чутливості лінійного фотоприймача, за рахунок стабілізації температури первинного перетворювача, вимірюваної та зразкової рідин і стабілізації струму джерела випромінювання.

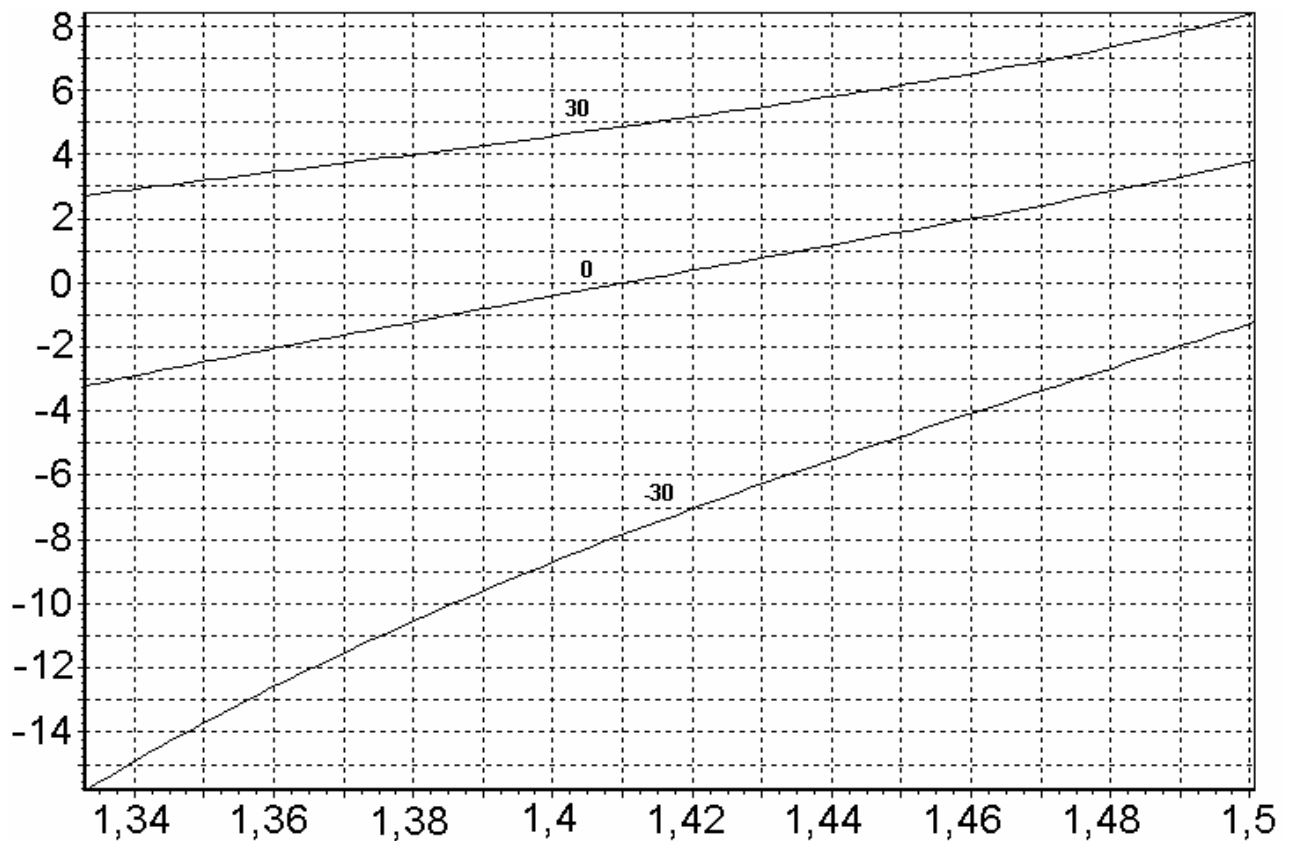


Рисунок 2 – Графік залежності F_{oi} від показника заломлення рідини при різних значеннях кута β

Запропоновані структурні способи підвищення точності вимірювань [6] реалізовані у експериментальному зразку (рис.3), що пройшов випробування у виробничих умовах на цукрових заводах України і Російської Федерації.

Абсолютна похибка вимірювання вмісту сухих речовин у дифузійному соку і сиропі не перевищувала $\pm 0,3\%$.

Розробка вимірювачів чистоти рідких продуктів цукрового виробництва

Конструктивні особливості розробленого первинного перетворювача вмісту сухих речовин (рис.4) дозволяють також, використовуючи діелектричні властивості цукрових розчинів, реалізувати функцію вимірювання вмісту цукру у розчинах і, відповідно, чистоту цукрових рідких продуктів.

Чутливий елемент 1 у вигляді прозорого циліндру виконують, наприклад, з сіталлу. Електроди 2 і 3 з нержавіючої сталі через фторопластові шайби 4 і 5 фіксують чутливий елемент 1. Фіксація чутливого елемента 1 здійснюється притягненням електродів 2 і 3 один до одного за допомогою, наприклад, непровідних гвинтів з текстоліту.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд експериментального зразка автоматичного рефрактометра

Нижній електрод 3 перекривається пробкою 6 при вливанні чергової проби рідини. Верхній електрод 2 виконаний у вигляді лійки для наливання чергової проби рідини. Між електродами 2 і 3 роблять отвори для здійснення рефрактометричних вимірювань: подачі світла діода випроміню-

вання і пропускання променів на фотоприймач. Провідники для здійснення діелектричних вимірювань закріплюють за допомогою гвинтів безпосередньо на електродах 2 і 3.

Як показали теоретичні та експериментальні дослідження представлена на рис. 4 еквівалентна електрична схема діелектрометричної комірки з вимірюваною рідиною може бути представлена паралельним з'єднанням електричного опору R_x та електричної ємності C_x .

При цьому зазначені параметри визначаються математичною моделлю, що описує перехідний процес у вимірювальній комірці:

$$u_x(t) = U \frac{R_x}{R_0 + R_x} (1 - e^{-t/\tau}) - U \frac{R_x}{R_0 + R_x} \left[1 - e^{-\frac{(t-t_u)}{\tau}} \right], \quad (4)$$

де R_0 – обмежувальний резистор між генератором прямокутних сигналів та діе-

лектрометричною коміркою, $\tau = \frac{R_0 \cdot R_x}{R_0 + R_x} C_x$ – постійна часу діелектрометричної комірки з рідиною, U і t_{in} – амплітуда і тривалість вхідного сигналу.

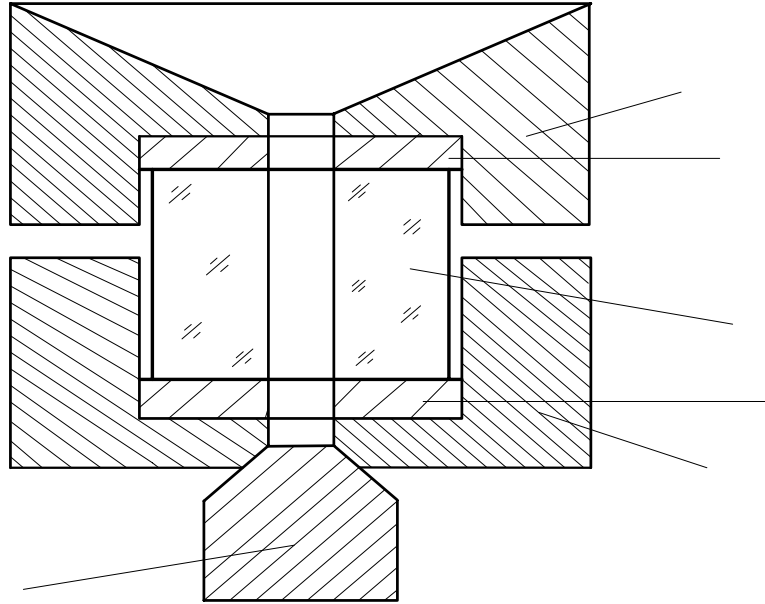


Рисунок 4 – Конструктивні особливості первинного перетворювача чистоти рідких продуктів

Вираз (4) дозволяє визначити електричну провідність та діелектричну проникність враховуючи, що електрична ємність пропорційна діелектричній проникності рідини. Концентрацію розчинів з діелектричними властивостями визначають шляхом одночасного вимірювання показника заломлення, діелектричної проникності та температури рідких середовищ, що знаходяться у чутливому елементі - прозорому порожнистому циліндрі, закріпленому між двома електродами [7].

Висновки

Запропоновано новий рефрактометричний спосіб вимірювання вмісту сухих речовин у рідких продуктах на основі прозорих порожнистих циліндрів, сформовані математичні моделі первинних перетворювачів автоматичних рефрактометрів, розроблені нові структурні способи підвищення точності автоматичних рефрактометрів, що реалізовані у експериментальних зразках автоматичних рефрактометрів, які пройшли успішні експлуатаційні випробування на цукрових заводах України та Російської Федерації.

Конструкція первинних перетворювачів рефрактометрів на основі прозорих порожнистих циліндрів дозволить у подальшому за умови додаткових вимірювань температури і діелектричної проникності рідини визначати концентрацію розчинів з діелектричними властивостями.

Отримані результати забезпечують умови створення високоточних автоматичних вимірювачів вмісту сухих речовин і концентрації рідин з діелектричними властивостями модульного типу, призначених для підвищення ефективності переробки рідких продуктів.

Література

1. Герасименко О. А. Хвалковський Т. П. Методи аналізу і контролю у виробництві цукру: Довідк.-метод. посібник для студентів вузів харчової пром-ті. – К.: Вища школа, 1992. – 388 с.
2. Харитонов Ю.Я. Физико-химические (инструментальные) методы анализа. – М.: Высшая школа, 2002. – 559 с.
3. 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.
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. Теленик С.Ф., Гришко В.Ф., Долина В.Г. Моделі первинних перетворювачів рефрактометрів на основі прозорих порожнистих циліндрів // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2005. – №1(15). – С.124 – 139.
6. Патент України № 10377, МПК7 G01N21/41, Пристрій для виміру показника заломлення/ В.Ф. Гришко, В.Г.Долина. (Україна). – Заявлено 19.04.05; Опубл. 15.11.05. Бюл. № 11, 2005 р.
7. Патент України № 12431, МПК7 G01N21/41, Спосіб вимірювання концентрації речовин у середовищах/ Гришко В.Ф., Долина В.Г., Заможний Д.В. та ін. (Україна). – Заявлено 17.06.05; Опубл. 15.02.06. Бюл. № 2, 2006 р.

Гришко В.Ф., Долина В.Г. Измерители содержания сухих веществ и концентрации жидких продуктов с диэлектрическими свойствами.

Описаны новые оптические измерители содержания сухих веществ в жидких продуктах и концентрации растворов с диэлектрическими свойствами. Предложены математические модели первичных преобразователей автоматических рефрактометров и диэлектрических ячеек на основе полых прозрачных цилиндров

Grishko V.T., Dolyna V.G. Solids content and concentration of liquid products with dielectric properties measuring instruments.

New optical dry matters in liquid products maintenance and concentration of solutions with dielectric properties measuring devices are described. The mathematical primary transformers models of automatic refractometers and dielectrometrical cells on the basis of hollow transparent cylinders are offered.

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*

УДК 531.719+621.373

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ НА ЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ

*Белявский В.С., Манак И.С., Беларуский государственный университет,
г. Минск, Беларусь*

Исследована модификация пространственно-временной структуры излучения лазерного диода в дальней зоне применительно к фазовой и импульсной светодальнометрии. Предложен фазовый светодальномер с разнесенными частотами модуляции, который позволяет значительно повысить точность измерений расстояний

Введение. Постановка задачи

При конструировании современных малогабаритных светодальномеров является предпочтительным использование полупроводниковых источников когерентного и некогерентного излучения, например лазерных диодов (ЛД). ЛД обладают рядом преимуществ: простотой устройства, компактностью, сопрягаемостью с другими элементами полупроводниковой электроники, большим сроком службы, малой инерционностью, высокой эффективностью преобразования подводимой электрической энергии в излучение, легкостью перестройки длины волны излучения изменением внешних условий [1, 2].

Тела свечения в зависимости от типа излучателя, конструктивных и технологических особенностей могут варьироваться в широких пределах: от единиц миллиметров до единиц микрон. При установке такого излучателя в фокальной плоскости передающего объектива дальномера на дистанцию поступает расходящийся пучок излучения. Чем больше размеры p - n перехода, тем большей неоднородностью пространственно-временной структуры (ПВС) излучения ЛД характеризуются. Вариации фазы модуляции и джиттера излучения в ближней зоне ЛД определяются наличием в полупроводнике локальных областей с различными временами жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ), которые в свою очередь зависят от нарушений стехиометрического состава, неравномерности в распределении примесей, дефектов структуры, дислокаций, от неодинакового уровня возбуждения отдельных участков активной области и т.д. ПВС излучения приводит к существенному возрастанию погрешности измерения расстояний. Таким образом, повышение точности измерений расстояний является актуальной задачей при разработке светодальномеров.

Фазовый метод измерения расстояний

В основе работы фазового светодальномера (ФСД) лежит фазовый метод измерения времени распространения модулированного аналоговым сигналом излучения инжекционного лазера, обеспечивающий малую погрешность, что необходимо при применении в геодезии и вообще в высокоточной дальнометрии. Эффективное применение ЛД в фазовой светодальнометрии обеспечивают только одномодовые лазеры.

Предположим, что лазерный диод излучает гармоническое колебание круговой частоты ω с начальной фазой φ_0 $U_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_0)$, где U_{m1} – амплитуда модуляции исходного сигнала. Пройдя расстояние D до отражателя и обратно сигнал попадает на фотоприемник, на выходе которого формируется гармоническое колебание с фазой, задержанной на время τ_{2D} :

$$U_2 = U_{m2} \sin[\omega(t - \tau_{2D}) + \varphi_0], \quad (1)$$

где U_{m2} – амплитуда модуляции исходного сигнала

При этом формула (1) не учитывает фазовые сдвиги в цепях передатчика и приемника. Фазометром измеряется разность фаз напряжений U_1 и U_2 $\varphi_{2D} = \omega\tau_{2D} = 2\pi f\tau_{2D}$. Зная скорость распространения излучения v вдоль измеряемого расстояния, искомое расстояние получаем в виде

$$D = \frac{v\tau_{2D}}{2} = \frac{v\varphi_{2D}}{4\pi f}. \quad (2)$$

Простейший фазовый светодальномер позволяет определять расстояния лишь до половины длины волны λ , соответствующей частоте модуляции f , когда выполняется условие однозначного измерения фазового сдвига $\varphi < 2\pi$.

Современные лазерные диоды позволяют принципиально измерять расстояния в дневных условиях до нескольких километров, а ночью – до нескольких десятков километров в пределах прямой видимости, что ограничивается мощностью генерируемого ими излучения. Приняв измеряемую дальность за 15 км, находим, что однозначно определить ее можно, модулируя излучение лазерного диода частотами порядка 10 кГц.

Однако при существующих методах измерения разности фаз принимаемого и ушедшего на дистанцию сигнала невозможно добиться высокой точности измерения расстояния при частоте модуляции лазерного диода порядка десятков килогерц. Повысить точность измерения расстояния можно, существенно увеличив частоту модуляции излучения инжекционного лазера.

В общем случае сдвиг фаз φ_{2D} представляется в виде

$$\varphi_{2D} = 2\pi N + \varphi. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим основное уравнение фазовой светодальнометрии:

$$D = \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\varphi}{2\pi} \right). \quad (4)$$

Устранение неоднозначности определения расстояний в фазовых светодальномерах

В выражении (4) две неизвестные величины: расстояние D , и целое число фазовых циклов N , укладываемых вдоль трассы $2D$. Частоту f , на которой измеряется фазовый сдвиг, называют масштабной. В фазовой дальнометрии оптического диапазона излучение ЛД модулируется обычно масштабными частотами от 10 до 500 МГц, а иногда в гигагерцевом диапазоне. Для устранения не-

однозначности в определении N лазер работает на двух частотах модуляции f_2 и f_1 , причем разностная частота $(f_2 - f_1)$ выбирается из условия $D_{max} < \frac{v}{2(f_2 - f_1)}$, где D_{max} – максимально возможное измеряемое расстояние до объекта.

Воспользовавшись основным уравнением фазовой светодальнометрии (4), имеем для частоты модуляции f_1 соотношение

$$D = \frac{v}{2f_1} \left(N + \frac{\Phi_1}{2\pi} \right). \quad (5)$$

Установив частоту f_2 , измеряем Φ_2 . Если $\Phi_2 > \Phi_1$, то записывается уравнение

$$D = \frac{v}{2f_2} \left(N + \frac{\Phi_2}{2\pi} \right). \quad (6)$$

Если же $\Phi_2 < \Phi_1$, то добавляется один дополнительный фазовый цикл:

$$D = \frac{v}{2f_2} \left(N + 1 + \frac{\Phi_2}{2\pi} \right). \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6), либо (5) и (7), находим искомые значения N и D .

Импульсный метод измерения расстояний

Очень малая длительность импульсов, генерируемых инжекционными лазерами, особенно в режимах модуляции добротности резонатора и синхронизации мод, в сочетании с умеренной энергией таких импульсов, открыла дорогу к созданию импульсных малогабаритных дальномеров различного назначения. Легкие переносные дальномеры имеют, как правило, несложное устройство: импульсный инжекционный лазер сочетается с небольшой приемо-передающей оптической системой с дополнительным устройством для визуального наведения на объект, приемником излучения на основе лавинного фотодиода и цифровым измерителем времени распространения оптического импульса.

При импульсном методе расстояние до объекта определяется по задержке прихода отраженного сигнала относительно момента излучения светового импульса: $D = \frac{vt}{2} = \frac{ct}{2n}$, где D – измеряемое расстояние, t – время задержки импульса на дистанции, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления среды распространения.

При одинаковой затрачиваемой мощности импульсный дальномер будет иметь больший радиус действия по сравнению с фазовым, поскольку пиковая мощность излучения с укорочением его длительности может быть значительно выше, чем при возбуждении ЛД на постоянном токе. Импульсные дальномеры на основе полупроводниковых лазеров применяются для измерения расстояний

от десятков метров и до нескольких километров. Погрешность измерения дальности такими приборами чаще всего составляет доли или единицы метров.

Причины возникновения пространственно-временной структуры излучения лазерного диода

Для полупроводниковых источников при импульсном возбуждении характерно некоторое запаздывание излучения относительно управляющего напряжения на *p-n*-переходе. Это запаздывание связано с накоплением заряда в активной области и достижением системой состояния пороговой инверсной населенности. Одновременно с указанными процессами идет рекомбинация неравновесных носителей заряда (ННЗ), препятствующая увеличению их концентрации.

При описании релаксации ННЗ пользуются характеристическими временами:

- τ_u – время жизни ННЗ для спонтанных излучательных переходов; τ_δ – безызлучательное время жизни ННЗ;
- τ_c – спонтанное время жизни ННЗ, определяемое как $1/\tau_c = 1/\tau_u + 1/\tau_\delta$,
- τ_{cm} – время жизни ННЗ для стимулированных излучательных переходов;
- τ_n – полное время жизни ННЗ, которое находится из соотношения $1/\tau_n = 1/\tau_u + 1/\tau_\delta + 1/\tau_{cm}$ [1].

Задержки начала генерации излучения $t_{зад}$ в ближней зоне ЛД при подаче импульса накачки есть функция времени жизни ННЗ τ_c и определяется выражением:

$$t_{зад} = \tau_{cn} \ln(I/(I - I_{пор})), \quad (8)$$

где I – ток накачки, $I_{пор}$ – пороговый ток накачки.

Зависимость мощности излучения от времени можно записать как:

$$P = P_0(1 - \exp(-t/\tau_n)), \quad (9)$$

где P – значение мощности излучения ЛД в момент времени t , P_0 – установившееся (максимальное) значение P .

Любые изменения величин, определяющих изменение времени жизни ННЗ и приводят к ПВС излучения импульсных ЛД.

В свою очередь вариации фазы модуляции излучения ЛД в ближней зоне имеют вид

$$\Delta\varphi = \arctg(-2\pi f \tau_n'') - \arctg(-2\pi f \tau_n'), \quad (10)$$

где τ_n' и τ_n'' – полное время жизни в двух областях ближней зоны, при сканировании которой наблюдается разброс фазы модуляции излучения.

Формирование пространственно-временной структуры излучения в дальней зоне

Моделируемый дальномер состоит из лазерного диода, передающего объектива и "экрана", где анализируется ПВС в дальней зоне и устанавливаемого на удвоенном расстоянии до лоцируемого объекта. Угол расходимости излучения

лазерного діода с широким омическим контактом и областью излучательной рекомбинации длиной 100 мкм принимался равным 10° .

Так как излучатель располагается в фокальной плоскости, в силу конечности его размеров на дистанцию подается расходящийся пучок, формирующий на экране изображение размером ~ 1 м на расстоянии в 1 км.

На формирование сигнала в области размером 2Δ и координатой Y в плоскости экрана влияют все участки излучающей поверхности диода, центральные лучи которых попадают в область $(Y - \Delta; Y + \Delta)$. Центральным лучом полагается луч, излученный диодом из некоторой точки перпендикулярно плоскости диода. Тогда справедлив следующий интеграл [3]:

$$I(Y, t) = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz)g(Kz, (t - \tau_L))dz, \quad (11)$$

где $I_0(Kz)$ – распределение интенсивности в ближней зоне ЛД, $1/K$ – коэффициент увеличения оптической системы $K = F/(L - F)$, F – фокусное расстояние объектива, $g(Kz, t)$ – функция модуляции излучения.

В случае работы лазерного диода в импульсном режиме функцию модуляции из (8) и (9) можно записать как

$$g(Kz, t) = 1 - \eta(t - t_{\text{зад}}(Kz)) \exp(-(\tau\eta(t - t_u) + t_u\eta(t - t_u) - t_{\text{зад}}(Kz))/\tau_n), \quad (12)$$

где η – функция Хевисайда, t_u – продолжительность электрического импульса, подаваемого на ЛД, $t_{\text{зад}}$ – время задержки излучения ЛД

В случае модуляции излучения ЛД аналоговым сигналом функция модуляции принимает вид:

$$g(Kz, t) = 1 + p \sin(\omega t + \varphi(Kz)), \quad (13)$$

где ω – частота модуляции, p – коэффициент глубины модуляции излучения, $\varphi(Kz)$ – фаза модуляции излучения в ближней зоне ЛД.

Нахождение структуры задержек излучения в дальней зоне (в плоскости "экрана") возможно при любом законе модуляции излучения путем усреднения сигнала в дальней зоне по области объектива и сравнения с пороговым значением. Этот метод является единственным в случае импульсного режима работы ЛД.

В случае фазового светодальномера можно упростить вычисления. Для этого подставим (13) в (11):

$$I(Y, t) = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz)(1 + p \sin(\omega(t - \tau_L) + \varphi(Kz)))dz. \quad (14)$$

После преобразования (14) имеем:

$$I(Y, t) = \frac{K}{2\Delta} (\sin(\omega(t - \tau_L)) \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz)(1 + p \cos(\varphi(Kz)))dz + \\ + \cos(\omega(t - \tau_L)) \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz)(1 + p \sin(\varphi(Kz)))dz + \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz)dz). \quad (15)$$

Так как интегралы $\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz$, $\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz$ и

$\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) dz$ не зависят от времени, то (15) можно преобразовать к виду:

$$I(Y, t) = \frac{K}{4\Delta} (A(Y) \sin(\omega(t - \tau_L) + \Theta(Y)) + I_{0Y}(Y)), \quad (16)$$

где

$$A(Y) = \frac{Kp}{2\Delta} \sqrt{\left(\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz \right)^2 + \left(\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz \right)^2},$$

$$\Theta(Y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \sin(\varphi(Kz)) dz}{\int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) \cos(\varphi(Kz)) dz} \right), \quad I_{0Y} = \frac{K}{2\Delta} \int_{Y-\Delta}^{Y+\Delta} I_0(Kz) dz.$$

Из выражения (16) видно, что форму результирующего сигнала определяют три величины A , Θ и I_{0Y} . В таком случае при определении фазы модуляции излучения в дальней зоне отсутствуют итерационные вычисления, что значительно упрощает процедуру нахождения разброса фазы модуляции излучения.

Анализ вариаций фазы модуляции и задержек излучения в дальней зоне

При изучении ПВС излучения ЛД интенсивность по всей области диода принималась постоянной, а распределение фазы модуляции и задержек излучения в ближней зоне задавалась следующим образом: с шагом 10^{-5} м случайным образом задержки излучения изменялись в пределах от $2,5 \cdot 10^{-10}$ до $7,5 \cdot 10^{-10}$ с, а отклонения фазы модуляции от 0° до 30° и интерполировались на всю область диода. В результате моделирования описанной выше системы получено распределение фазы модуляции излучения ЛД, представленное на рис. 1. Из рис. 1 видно, что после усреднения приемным объективом разброс фазы модуляции излучения ЛД в дальнейшей зоне уменьшился до 20°

Разброс задержек излучения в дальней зоне уменьшился по сравнению с разбросом задержек излучения в ближней зоне и варьируется в пределах $\sim 5 \cdot 10^{-10}$ с (рис. 2), а точность измерения расстояний с учетом джиттера излучения, усредненного приемным объективом, составила 0,15 м.

Из рассмотренных примеров видно, что для заметного уменьшения влияния вариаций фазы модуляции и джиттера излучения ЛД на точность измерений расстояний дальномерами требуется использование передающих объективов с большим фокусным расстоянием или приемных большого диаметра, что нецелесообразно при построении малогабаритных светодальномеров.

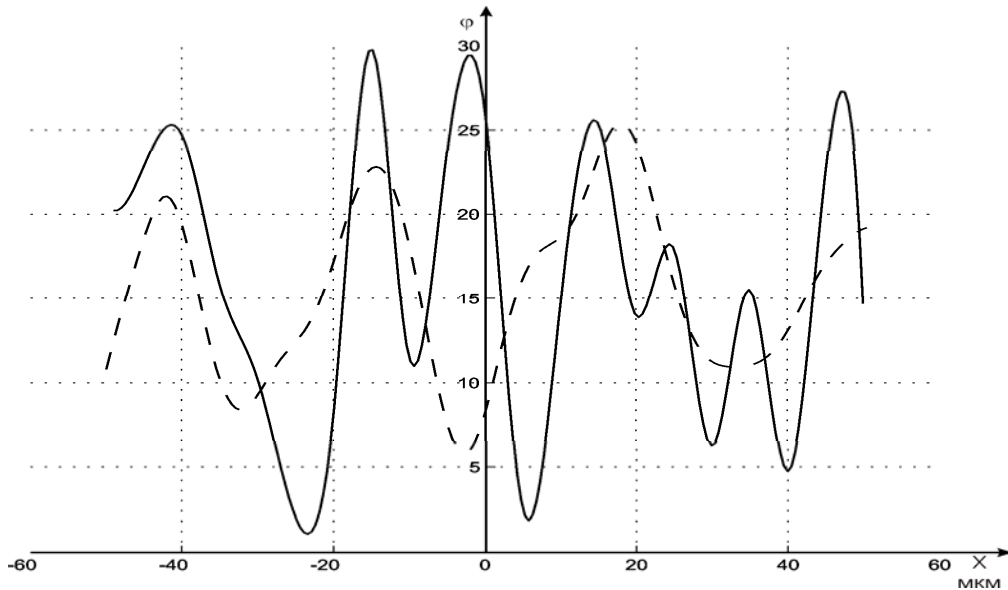


Рисунок 1 – Зависимость фазы модуляции в ближней зоне ЛД (сплошная линия) и результирующей фазы модуляции излучения на объективе (штриховая линия), пересчитанной к ближней зоне ЛД

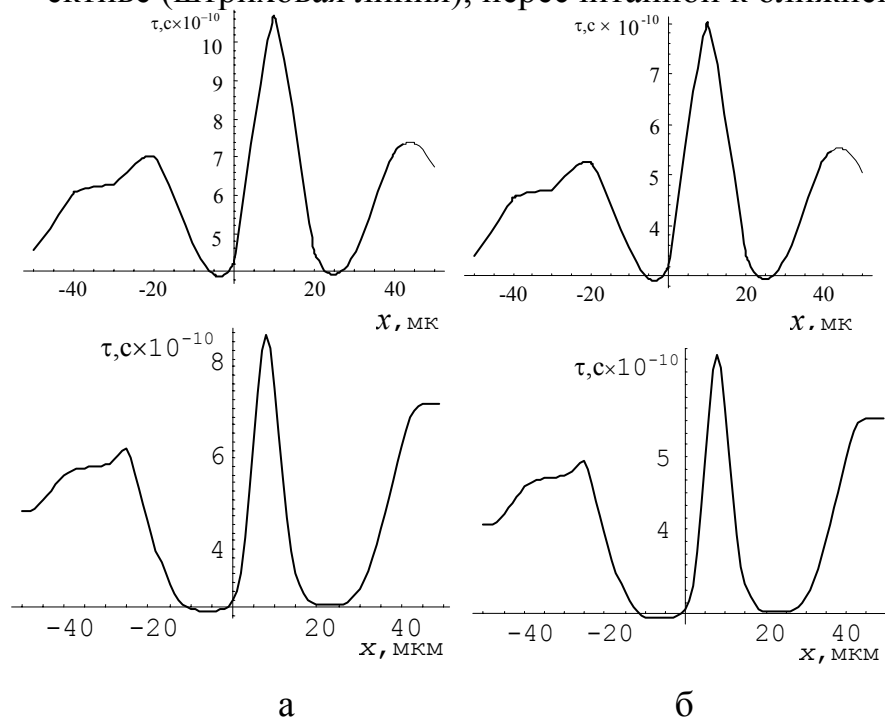


Рисунок 2 – Зависимость распределения задержек излучения в ближней зоне ЛД (верхние графики) и результирующих задержек в дальней зоне (нижние графики) на расстоянии $2D$ при $I/I_{пор}$ 1,3(а) и 1,5(б), пересчитанных к ближней зоне ЛД

Фазовый дальномер с разнесенными частотами модуляции

В случае модуляции излучения ЛД аналоговым сигналом предложен следующий способ повышения точности измерения расстояния. Пусть светодальномер работает на двух далеко разнесенных частотах модуляции излучения, например $f_1 = f$ и $f_2 = 2f$. Для каждой из частот избавимся от неоднозначности

в определении D вышеописанным способом. Тогда для определения искомого расстояния, можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} D = \frac{v}{2f_1} \left(N_1 + \frac{\varphi_1 + \varphi_{10}}{2\pi} \right), \\ D = \frac{v}{2f_2} \left(N_2 + \frac{\varphi_2 + \varphi_{20}}{2\pi} \right), \\ \varphi_{10} = \arctg(-2\pi f_1 \tau_n), \\ \varphi_{20} = \arctg(-2\pi f_2 \tau_n), \end{cases} \quad (17)$$

где φ_1 и φ_2 – фазы, полученные при измерении; φ_{10} и φ_{20} – задержки фазы модуляции излучения в источнике, N_1 и N_2 – количество полных волн, укладываемых в измеряемое расстояние на соответствующих частотах.

Нетрудно убедиться, что система (17) имеет единственное решение для $D > 0$ и $\varphi_{10}, \varphi_{20}$ принадлежащих промежутку $(-\pi/2; 0]$. Этим решением и будет точное значение расстояния. Отметим также, что решение системы (17) не может быть представлено в замкнутой форме, т.е. неизвестные $D, \varphi_{10}, \varphi_{20}$, нельзя задать в виде явных функций параметров f_1 и $f_2, \varphi_1, \varphi_2$. Поэтому для ее решения следует применять численные методы.

Выводы

Проведено исследование трансформации ПВС ЛД в дальней зоне применительно к фазовой и импульсной светодальнометрии. Построена математическая модель светодальномера. В результате проведенных исследований установлено влияние размеров и оптических параметров элементов светодальномера на его точностные характеристики. Предложен фазовый светодальномер с разнесенными частотами модуляции, который в дальнейшем позволит значительно повысить точность измерений.

Литература

1. Лазерная дальнометрия. / Под ред. В.П. Васильева. - М.: Радио и связь, 1995. - 257 с.
2. Карих Е.Д., Манак И.С. Полупроводниковые лазеры. - Мн.: БГУ, 1999. - 199 с.
3. U. S. Bialiauski, I. S. Manak Influence Laser Diode Radiation Phase Non-Uniformity Account for Improvement Phototachymeter Accuracy Characteristics // Electronics and Electrical Engineering. – 2006. – №3(67). - С. 5-8.

Білявський В.С., Манак І.С. Особливості побудови світлодалномірів на лазерних діодах

Досліджена модифікація просторово-часової структури випромінювання лазерного діода в дальній зоні стосовно до фазової та імпульсної світлодалнометрії. Запропонований фазовий світлодалномір з рознесеними частотами модуляції, що дозволяє значно підвищити точність вимірювань відстаней.

Bialiauski U.S., Manak I.S. Some features of construction photo range-finder on laser diodes

Investigating of laser diode radiation space-time structure in a distant zone with reference to phase and pulse photometry is investigated. It is offered phase photo range-finder with the carried modulation frequencies which allows to increase distances measurements accuracy considerably.

*Надійшла до редакції
12 червня 2006 року*