

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

Використання методів надлишкових вимірювань при створенні вимірювачів концентрації речовин передбачає безпосереднє застосування мікропроцесорів та відповідних виконавчих елементів для автоматизації процесу вимірювання, що забезпечує скорочення часу вимірювання, підвищення точності результатів вимірювання та виконання команд щодо підготовки процесу вимірювання. В роботі наведено вирішення задачі підвищення точності результату вимірювання концентрації речовин у технологічних розчинах у широкому діапазоні значень концентрації методами надлишкових вимірювань. Описана робота мікропроцесорного вимірювача концентрації речовин в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль з автоматичною корекцією систематичних похибок.

© В.Т. Кондратов, В.Б. Сітар, 2004

УДК 535.08; 681.7.08

В.Т. КОНДРАТОВ, В.Б. СІТАР

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ВИМІРЮВАЧ КОНЦЕНТРАЦІЇ РЕЧОВИН В УЛЬТРАФІОЛЕТОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Завдяки високій чутливості ультрафіолетові аналізатори-вимірювачі міцно посіли своє місце серед пристроїв для вимірювання концентрації речовин у технологічних розчинах. Важливе значення має визначення концентрації рідкоземельних і дорогоцінних металів та деяких біологічних сполук в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль. Оскільки кожен грам зазначених металів має високу цінність, стоїть задача високоточного їх вимірювання в технологічних середовищах з метою їх виділення та подальшого використання.

Існуючі методи і засоби вимірювання концентрації речовин [1–5] частково вирішують цю задачу тому, що ще остаточно не вирішена задача стабілізації параметрів фотоприймачів від дії температури та деградації чутливих елементів у часі. Це призводить до виникнення додаткових систематичних похибок вимірювання. Для їх зменшення частіше за все здійснюють вибір фотоприймача зі стабільними характеристиками та його термостатування. Термостатування забезпечує температурну стабілізацію параметрів фотоприймача, але не захищає його від впливу інших дестабілізуючих факторів (тиску, електричних та магнітних полів тощо). Підбір фотоприймачів зі стабільними параметрами потребує додаткових матеріальних витрат. У зв'язку з цим актуальною є розробка високоточних цифрових вимірювачів концентрації речовин.

Нижче розглядається вирішення задачі створення мікропроцесорного вимірювача з

автоматичною корекцією похибок результату вимірювання концентрації речовин в технологічних розчинах, наприклад міді, який реалізує метод надлишкових вимірювань.

Вирішення цієї задачі розглянемо на прикладі роботи мікропроцесорного вимірювача концентрації речовин в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль, структурна схема якого наведена на рисунку.

В основу реалізованого методу покладений закон Ламберта – Бера [2], який характеризує залежність поглинання потоку ультрафіолетового випромінювання з визначеною довжиною хвилі від концентрації поглинаючої речовини і від товщини шару, у якому відбувається поглинання. Аналітично цей закон описується рівнянням величин

$$I = I_0 \cdot e^{-kcd} = I_0 \cdot e^{-ck_c}, \quad (1)$$

де I, I_0 – інтенсивності монохроматичного випромінювання до і після проходження досліджуваної речовини; k – коефіцієнт поглинання досліджуваної речовини, заданої довжини хвилі; c – концентрація вимірюваної речовини; d – товщина шару. Прийmemo, що $k_c = k \cdot d$.

Припустимо, що функція перетворення фотоприймача має лінійний характер і описується рівнянням величин

$$U_n = S'_l I_{yf} + \Delta U'_n, \quad (2)$$

де I_{yf} – інтенсивність потоку ультрафіолетового випромінювання; S'_l – крутість перетворення ($\{S'_l\} = \{S_l\} \pm \{\Delta S_l\}$); $\Delta U'_n$ – зміщення функції перетворення з урахуванням адитивної похибки ($\{\Delta U'_n\} = \{\Delta U_n\} + \{\Delta_{ad}\}$); ΔS_l – абсолютне відхилення крутості (чутливості) під дією дестабілізуючих факторів.

На структурній схемі мікропроцесорного вимірювача концентрації речовин у технологічних розчинах використовуються такі позначення: 1 – джерело живлення; 2 – оптико-електронний канал; 3 – генератор монохроматичного випромінювання; 4 – перша фокусуюча лінза; 5 – складана кювета; 6 – робоча камера для досліджуваного технологічного розчину; 7 – камера порівняння для розчину з нормованою концентрацією; 8 – друга фокусуюча лінза; 9 – фотоприймач з підсилювачем; 10 – квадратор; 11 – керований інтегратор; 12 – перетворювач “напруга – частота”; 13 – мікропроцесор; 14 – дешифратор з регістром; 15 – блок підсилювачів потужності; 16 – цифровий відліковий пристрій; 17, 18, 19, 20 – ємності з розчинами відомих (C_1, C_2) і невідомої (C_x) концентрацій досліджуваної речовини; 21 – мікронасос з двигуном; 22, 23 і 24 – перший, другий і третій клапани постачання; 25, 26 і 27 – перший, другий і третій зливні клапани; 28 і 29 – перший і другий сенсори рівня.

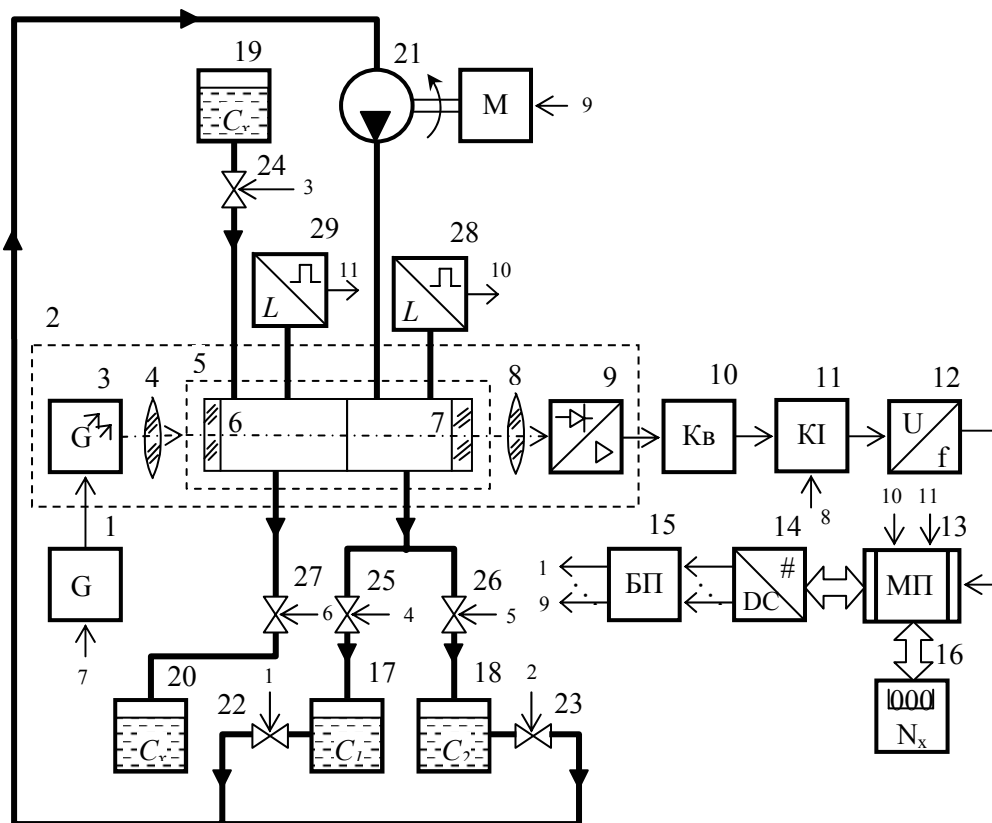


РИСУНОК. Структурна схема мікропроцесорного вимірювача концентрації речовин

Робота пристрою для вимірювання концентрації речовин у технологічних розчинах складається з п'яти тактів вимірювання й одного такту обробки. У кожному такті вимірювання потік ультрафіолетового випромінювання з виходу генератора 3 монохроматичного випромінювання проходить через першу фокусуючу лінзу 4, складану кювету 5, що містить робочу камеру 6 і камеру 7 порівняння, і надходить, через другу фокусуючу лінзу 8, на фотоприймач 9. Підсилена вихідна напруга фотоприймача 9 за допомогою послідовно ввімкнених квадратора 10 і інтегратора 11 перетворюється в дійсне значення напруги U_n протягом заданого інтервалу часу Δt .

По закінченні інтервалу часу Δt вихідна напруга U_n інтегратора 11 за допомогою перетворювача “напруга – частота” 12 перетворюється в частоту f_n ($\{f_n\} = \{f_0\} + \{\Delta f_n\}$, де $\{f_0\}$ – початкова частота електричного сигналу; $\{\Delta f_n\}$ – приріст частоти електричного сигналу, пропорційний концентрації, що визначається) електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється

вимірювання частоти f_n . Результат вимірювання N_n ($N_n = \{t_0\} + \{f_n\}$, де t_0 – інтервал часу підрахування імпульсів) запам'ятовується.

При здійсненні першого такту вимірювання за командою з мікропроцесора 13 відкривається клапан постачання 22 і мікронасос 21 заповнює камеру 7 порівняння розчином з нормованою за розміром концентрацією C_1 досліджуваної речовини. По заповненню камери 7 порівняння спрацьовує сенсор 28 рівня і, за командою з мікропроцесора 13, вимикається мікронасос 21 та закривається клапан постачання 22. Внаслідок вимірювання у першому такті напруга на виході інтегратора 11 описується рівнянням величин

$$U_1 = \frac{1}{\Delta t_1} \int_{t_0}^{t_1} [u_1(t)]^2 dt = I_0 e^{(-[k_1 C_1 + k_2(1-C_1)]l_2 - k_2 l_1 - B_{on} - B_{cn})} S'_n + \Delta U', \quad (3)$$

де Δt_1 – час вимірювання ($\{\Delta t_1\} = \{t_1\} - \{t_0\} = \{\Delta t\}$); $u_1(t)$ – напруга, отримана внаслідок перетворення інтенсивності потоку ультрафіолетового випромінювання, що пройшло через складану кювету з розчином концентрації C_1 ; k_1 та k_2 – коефіцієнти поглинання, відповідно, досліджуваної речовини та технологічного розчину; B_{on} – оптичне послаблення, що вноситься стінками кювети та елементами оптичного тракту; B_{cn} – показник забруднення скла робочої камери кювети; l_1 та l_2 – довжини робочої камери та камери порівняння відповідно.

Напруга (3) за допомогою перетворювача “напруга-частота” 12 перетворюється в частоту f_1 електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється вимірювання частоти f_1 цього сигналу. Результат N_1 вимірювання частоти f_1 ($N_1 = \{f_1\} \{\Delta t_0\} = \{S_0\} \{U_1\} \{\Delta t_0\}$, де $\{S_0\}$ – крутість перетворення напруги в частоту) запам'ятовується. За командою з мікропроцесора 13 відкривається зливний клапан 25 і здійснюється спорожнення камери 7 порівняння в ємність 17.

У другому такті вимірювання за командою з мікропроцесора 13 відкривається клапан постачання 23 і мікронасос 21 заповнює камеру 7 порівняння розчином з концентрацією C_2 ($\{C_2\} = \{C_1\} + \{\Delta C\}$) досліджуваної речовини. Причому розмір концентрації C_2 відрізняється від попереднього розміру концентрації C_1 на $\{\Delta C\} \geq 3\{\sigma\}$, де σ – середньоквадратичне відхилення похибки n результатів вимірювань з імовірністю $P = 0,95$. Після заповнення камери 7 порівняння спрацьовує сенсор 28 рівня і, за командою мікропроцесора 13, вимикається мікронасос 21 та закривається клапан постачання 23. Внаслідок вимірювання у другому такті напруга на виході інтегратора 11 описується рівнянням величин

$$U_2 = \frac{1}{\Delta t_2} \int_{t_2}^{t_3} [u_2(t)]^2 dt = I_0 e^{(-[k_1 C_2 + k_2(1-C_2)]l_2 - k_2 l_1 - B_{on} - B_{cn})} S'_n + \Delta U', \quad (4)$$

де Δt_2 – час вимірювання ($\{\Delta t_2\} = \{t_3\} - \{t_2\} = \{\Delta t\}$); $u_2(t)$ – напруга, що отримана внаслідок перетворення інтенсивності потоку ультрафіолетового випромінювання, що пройшло через складану кювету з розчином концентрації C_2 речовини.

Напруга (4) за допомогою перетворювача “напруга-частота” 12 перетворюється в частоту f_2 електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється вимірювання частоти f_2 цього сигналу. Отриманий результат N_2 ($N_2 = \{f_2\} \{\Delta t_0\} = \{S_0\} \{U_2\} \{\Delta t_0\}$) вимірювання частоти f_2 запам’ятовується.

У третьому такті за командою мікропроцесора 13 відкривається клапан постачання 24 і робоча камера 6 заповнюється досліджуванним розчином з невідомою концентрацією C_x речовини. У камері 7 порівняння залишається розчин з тією ж концентрацією речовини, що й у попередньому такті. По заповненню робочої камери 6 спрацьовує сенсор 29 рівня і, за командою мікропроцесора 13, закривається клапан постачання 24. Внаслідок вимірювання у третьому такті напруга на виході інтегратора 11 описується рівнянням величин

$$U_3 = \frac{1}{\Delta t_3} \int_{t_4}^{t_5} [u_3(t)]^2 dt = I_0 e^{(-k_1(C_x+C_2)+k_2(1-(C_x+C_2)))l_2-k_2l_1-B_{on}-B_{cn}} S'_n + \Delta U', \quad (5)$$

де Δt_3 – час вимірювання ($\{\Delta t_3\} = \{t_5\} - \{t_4\} = \{\Delta t\}$); $u_3(t)$ – напруга, отримана внаслідок перетворення інтенсивності потоку ультрафіолетового випромінювання, що пройшло через складану кювету з розчинами концентрацій C_2 та C_x .

Напруга (5) за допомогою перетворювача “напруга-частота” 12 перетворюється в частоту f_3 електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється вимірювання частоти f_3 цього сигналу. Результат вимірювання N_3 ($N_3 = \{f_3\} \{\Delta t_0\} = \{S_0\} \{U_3\} \{\Delta t_0\}$) запам’ятовується. За командою з мікропроцесора 13 відкривається зливний клапан 26 і здійснюється спорожнення камери 7 порівняння в ємність 18.

У четвертому такті в робочій камері 6 знаходиться досліджуваний розчин з тією ж концентрацією C_x речовини. За командою з мікропроцесора 13 відкривається клапан постачання 22 і мікронасос 21 заповнює камеру 7 порівняння розчином з нормованою за розміром концентрацією C_1 речовини. Після заповнення камери 7 порівняння спрацьовує сенсор 28 рівня і, за командою мікропроцесора 13, вимикається мікронасос 21 та закривається клапан постачання 22. Внаслідок вимірювання у четвертому такті напруга на виході інтегратора 11 описується рівнянням величин

$$U_4 = \frac{1}{\Delta t_4} \int_{t_6}^{t_7} [u_4(t)]^2 dt = I_0 e^{(-k_1(C_x+C_1)+k_2(1-(C_x+C_1)))l_2-k_2l_1-B_{on}-B_{cn}} S'_n + \Delta U', \quad (6)$$

де Δt_4 – час вимірювання ($\{\Delta t_4\} = \{t_7\} - \{t_6\} = \{\Delta t\}$); $u_4(t)$ – напруга, отримана внаслідок перетворення інтенсивності потоку ультрафіолетового випромінювання, що пройшло через складану кювету з розчинами концентрацій C_1 та C_x речовини.

Напруга (6) за допомогою перетворювача “напруга – частота” 12 перетворюється в частоту f_4 електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється вимірювання частоти f_4 цього сигналу. Отриманий результат N_4 ($N_4 = \{f_4\} \{\Delta t_0\} = \{S_0\} \{U_4\} \{\Delta t_0\}$) вимірювання запам’ятовується.

У п’ятому такті за командою мікропроцесора 13 відкриваються зливні клапани 25 та 27 і здійснюється спорожнення складаної кювети 5. Вимикають джерело 1 монохроматичного випромінювання. В цьому разі виключається проходження потоку монохроматичного ультрафіолетового випромінювання через незаповнені камери складаної кювети 5. В дійсне значення напруги U_5 перетворюється вже інтенсивність темного потоку. Внаслідок вимірювання напруга на виході інтегратора 11 описується наступним рівнянням величин:

$$U_5 = \frac{1}{\Delta t_5} \int_{t_8}^{t_9} [u_5(t)]^2 dt = \Delta U', \quad (7)$$

де Δt_5 – час вимірювання ($\{\Delta t_5\} = \{t_9\} - \{t_8\} = \{\Delta t\}$); $u_5(t)$ – напруга, отримана внаслідок перетворення інтенсивності потоку ультрафіолетового випромінювання, що пройшло через незаповнені камери складаної кювети. Отримана напруга (7) за допомогою перетворювача “напруга-частота” 12 перетворюється в частоту f_5 електричного сигналу. За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється вимірювання частоти цього сигналу. Результат N_5 ($N_5 = \{f_5\} \{\Delta t_0\} = \{S_0\} \{U_5\} \{\Delta t_0\}$) вимірювання запам’ятовується.

Отримані результати проміжних вимірювань концентрації обробляються згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$C_x = (C_2 - C_1) \cdot \ln \frac{(U_1 - U_5)(U_2 - U_5)}{(U_3 - U_5)(U_4 - U_5)} / (n_2 \cdot \ln \frac{U_1 - U_5}{U_2 - U_5}), \quad (8)$$

де $n_2 = 2$.

За допомогою мікропроцесора 13 здійснюється обробка результатів проміжних вимірювань N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 відповідно до рівняння числових значень

$$N_x = (\{C_2\} - \{C_1\}) \cdot \ln \frac{(N_1 - N_5)(N_2 - N_5)}{(N_3 - N_5)(N_4 - N_5)} / (n_2 \cdot \ln \frac{N_1 - N_5}{N_2 - N_5}). \quad (9)$$

Код числа N_X , який характеризує кінцевий результат вимірювання, відображається на цифровому відліковому пристрої 16.

Якщо підставити у (8) вирази (3) – (7) для напруг, то не важко переконатися, що обробка результатів проміжних вимірювань за рівнянням числових значень (9) забезпечує автоматичну корекцію систематичних похибок результатів вимірювань, обумовлених нестабільністю параметрів фотоприймача і дрейфу нуля.

Таким чином, запропонований мікропроцесорний вимірювач концентрації речовин, який реалізує метод надлишкових вимірювань концентрації речовин, забезпечує розв'язання задачі автоматичної корекції систематичних похибок. Використання мікропроцесора 13 забезпечило скорочення часу вимірювання концентрації більше ніж в 10 разів за рахунок автоматичного керування процесом заповнення та спорожнення кювет і обчислення результатів проміжних вимірювань.

Попередня оцінка показала можливість створення цифрового вимірювача концентрації речовин з відносною похибкою $\gamma = \{0,5 \dots 1\} \%$.

1. *Ваня Я.* Анализаторы газов и жидкостей / Пер. с чеш.; Под ред. О. С. Арутюнова. – М.: Энергия, 1970. – 552 с.
2. *Булатов М.И., Калинин И.П.* Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. – 5-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1986. – 432 с.
3. *Баркан М.Я., Каралис В.Н.* Двухканальный ультрафиолетовый фотометр // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 5. – С. 166–167.
4. *А.с. № 2012868.* Однолучевой многоканальный анализатор / В.Р. Козубовский, Т.И. Повхан. – Опубл. 15. 05. 1994. Бюл. № 9.
5. *А.с. № 1807356.* Фотоэлектрический способ определения концентрации жидких и газообразных сред / В.С. Михалевич, В.Т. Кондратов, Ю.А. Скрипник. – Опубл. 07. 04. 1993. Бюл. № 13.

Отримано 18.02.2004