

УДК 621.311.25

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНФРАЧЕРВОНОГО АНАЛІЗАТОРА ВОЛОГОСТІ ГАЗУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Й. Й. Білінський¹⁾, О. С. Городецька¹⁾, М. Й. Юкиш¹⁾, В. В. Онушко²⁾

1) – Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21010, тел. (0432)598-358, e-mail: biloshkursky@ukr.net

2) – ДП «Укрметртестстандарт», вул. Метрологічна, 4, м. Київ, тел. (044)526-53-86

Запропоновано математичну модель інфрачервоного аналізатора вологості газу на основі використання частотно-імпульсної модуляції та функціональну схему аналізатора, наведено опис його роботи.

Ключові слова: відносна вологість, частотно-імпульсна модуляція, водяна пара, сухий газ, тиск, температура, показник поглинання, густина.

Предложено математическую модель инфракрасного анализатора влажности газа на основе использования частотно-импульсной модуляции и функциональную схему анализатора, приведено описание его работы.

Ключевые слова: относительная влажность, частотно-импульсная модуляция, водяной пар, сухой газ, давление, температура, показатель поглощения, плотность.

A mathematical model of infrared analyzer moisture gas based of pulse frequency modulation and functional scheme of the analyzer have been developed, the description of work has been given.

Key words: relative humidity, pulse frequency modulation, water vapor, dry gas, pressure, temperature, absorbance, density.

Областю застосування гігрометрів є контроль вологості газоподібних середовищ у різних галузях людської діяльності: мікроелектроніці, хімічній та фармакологічній промисловості, атомній енергетиці, а також контроль природного газу при його транспортуванні. Основною особливістю застосування гігрометрів є підвищені вимоги до їх метрологічних характеристик в області низьких концентрацій вологи.

Як показав порівняльний аналіз методів вимірювання вологості технологічних газів [1–4], на сьогодні одним з найбільш перспективних є абсорбційний метод. Специфіка галузей застосування аналізаторів вологості висуває особливі вимоги до функціональних характеристик випромінювачів та фотоприймачів, що використовуються в їх складі. На сьогодні перспективними випромінювачами таких сенсорів можуть бути лазерні світлодіоди, які стабільно працюють в імпульсному режимі. При цьому широкого розповсюдження набуває частотно-імпульсна модуляція, оскільки використання амплітудної модуляції обумовлює нелінійність модуляційної характеристики випромінюючого діода [5].

Метою роботи є розроблення математичної моделі інфрачервоного аналізатора вологості

газу на основі використання частотно-імпульсної модуляції.

В роботі запропоновано двохвильовий аналізатор вологості газу, який працює на робочій довжині хвилі (ν_1) та опорній (ν_2). Даний аналізатор може розглядатися як двоканальний: перший канал – вимірювальний, налаштований на частоту випромінювання f_1 лазерного світлодіода, другий – опорний, налаштований на частоту f_2 .

При проходженні через досліджуваний газ світловий потік $I_0(\nu_1)$ від лазерного світлодіода ослаблюється й у вигляді світлового потоку $I(\nu_1)$ потрапляє на фотоприймач. Даний зв'язок описується виразом

$$I(\nu_1) = I_0(\nu_1) \cdot K_{cp1}, \quad (1)$$

де K_{cp1} – коефіцієнт ослаблення світлового потоку при проходженні вимірювального середовища на вимірювальній довжині хвилі, який визначається так [6]:

$$K_{cp1} = e^{-\frac{dT(c)}{P(c)TZ} \left(\frac{K_{(v1)}^{B.P.} \rho_c^{B.P.} \Phi P_{e.n.max} + \mu_{B.P.}}{+K_{(v1)}^{C.T.} \rho_c^{C.T.} (P - \Phi P_{e.n.max})} \right) \mu_{C.T.}}, \quad (2)$$

де d – товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла I_0 ; p_c , T_c – тиск і температура газу за стандартних умов; T – температура газу; Z – коефіцієнт стисливості; $K_{(v)}^{C.G.}$, $K_{(v)}^{B.П.}$ – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари на частоті ν відповідно; $p_{e.n.(max)}$ – максимальний тиск водяної пари; $\rho_c^{B.П.}$ – густина водяної пари за стандартних умов; p – тиск газу; ϕ – відносна вологість газу; $\mu_{B.П.}$, $\mu_{C.G.}$ – молекулярна маса водяної пари та сухого газу.

Світловий потік $I(\nu_1)$ буде постійним тільки у випадку компенсації ослаблення світлового потоку $I_0(\nu_1)$ та збільшення густини водяної пари $r_{B.П.}$ при відомих значеннях молярних питомих показників поглинання природного сухого газу та водяної пари $K^{C.G.}$ та $K^{B.П.}$, відповідно. Це означає, що світловий потік повинен змінюватись в зворотну сторону, обернену збуджуючому впливу $\left(K_{(v)}^{B.П.} \frac{\rho_{B.П.}}{\mu_{B.П.}} + K_{(v)}^{C.G.} \frac{\rho_{C.G.}}{\mu_{C.G.}} \right)$, оскільки e^{-d} – постійна величина.

В роботі запропоновано аналізатор вологості природного газу з оберненим зв'язком на основі використання частотно-імпульсної модуляції. Аналізатор складається з опорного і вимірювального каналів [7]. Світловий потік, що випромінюється лазерним світлодіодом, проходить через вимірювальне середовище, перетворюється в електричний сигнал на виході фотоприймача, підсилюється та подається на генератор, на виході якого формується частотно-імпульсний сигнал, частота якого змінюється в залежності від величини електричного сигналу. Частотно-імпульсний сигнал підсилюється підсилювачем потужності в струмовий електричний сигнал і поступає на лазерний світлодіод. Вимірювальний і опорний канал охоплені глибоким від'ємним зворотнім зв'язком, тому світловий потік, що потрапляє на фотоприймач, залишається постійним. При цьому електричний сигнал з підсилювача потужності потрапляє на мікропроцесор і порівнюється з електричним сигналом від підсилювача потужності вимірювального каналу. Отриманий від порівняння сигнал обробляється за алгоритмом на основі математичної моделі [8] і результат обробки у вигляді значень відносної вологості видається на індикаторний пристрій.

Струм фотодіода визначається виразом

$$I_{D1} = K_{D1} \cdot I(\nu_1), \quad (3)$$

де $K_{D1} = \tau_{cc} K_{III}$ – коефіцієнт перетворення світлового потоку фотодіода, τ_{cc} – коефіцієнт пропускання оптичної системи; K_{III} – коефіцієнт передачі попереднього підсилювача.

Вихідний сигнал фотодіода підсилюється попереднім підсилювачем, де відбувається порівняння вхідної напруги $U_{ex\nu1}$, що визначається через величину струму фотодіода I_{D1} , і U_{on1} опорної напруги, причому опорна напруга виставляється як початкова (нульова) освітленість фотоприймача:

$$U_{ex\nu1} = I_{D1} R, \quad (4)$$

$$U_{вих\nu1} = (U_{on1} - U_{ex\nu1}) \cdot K_{y1}, \quad (5)$$

де K_{y1} – коефіцієнт перетворення попереднього підсилювача вимірювального каналу.

В мікропроцесорі порівнюються величини електричних сигналів з підсилювачів потужності вимірювального та опорного каналів.

Вихідна напруга $U_{вихM1}$ підсилювача потужності дорівнює добутку вхідної напруги U_{exM1} на коефіцієнт перетворення даного підсилювача K_{M1} , тобто

$$U_{вихM1} = U_{exM1} \cdot K_{M1}. \quad (6)$$

Оскільки $U_{exM1} = U_{ex\nu1} \cdot K_{\kappa1} \cdot K_{\Gamma1}$, де $K_{\kappa1}$ – коефіцієнт перетворення комутатора, $K_{\Gamma1}$ – коефіцієнт перетворення керованого генератора вимірювального каналу, то вихідна напруга підсилювача потужності визначається так:

$$U_{вихM1} = (U_{on1} - I_{D1} \cdot K_{R1}) \cdot K_{y1} \cdot K_{\kappa1} \cdot K_{\Gamma1}, \quad (7)$$

де K_{R1} – коефіцієнт перетворення резистора R (рис. 1).

Підставимо в (7) замість I_{D1} значення з (3) і отримаємо, що

$$U_{вихM1} = (U_{on1} - I_0(\nu_1) \cdot K_{D1} \cdot K_{R1}) \cdot K_n.$$

Тоді з урахуванням (1) отримаємо

$$U_{вихM} = (U_{on1} - I_0(\nu_1) \cdot K_{cp1} \cdot K_{D1} \cdot K_{R1}) \cdot K_n. \quad (8)$$

Світловий потік випромінюваний лазерним світлодіодом прямо пропорційно залежить від напруги, яка потрапляє на нього, тобто

$$I_0(v_1) = U_{вихM1} \cdot K_{л1}, \quad (9)$$

де $K_{л1}$ – коефіцієнт перетворення світлодіода.

З іншої сторони

$$U_{вихM} = (U_{он1} - I_0(v_1) \cdot K_{сп1} \cdot K_{Д1} \cdot K_{R1}) \cdot K_{н1} \cdot K_{л1}. \quad (10)$$

Величина світлового потоку світлодіода згідно (10) визначається так:

$$I_0(v_1) = \frac{U_{он1} \cdot K_{н1} \cdot K_{л1}}{1 + K_{сп1} \cdot K_{Д1} \cdot K_{R1} \cdot K_{н1} \cdot K_{л1}}. \quad (11)$$

Так як коефіцієнт підсилення $K_{н1}$ значно перевищує одиницю, то ним можна знехтувати. Тоді (11) набуде вигляду:

$$I_0(v_1) = \frac{U_{он1}}{K_{сп1} \cdot K_{Д1} \cdot K_{R1}}. \quad (12)$$

Підставивши значення $U_{вихM1}$, отримаємо:

$$U_{вихM1} = \frac{U_{он1} \cdot K_{л1}}{K_{сп1} \cdot K_{Д1} \cdot K_{R1}}.$$

Тоді з урахуванням (2) вираз (12) запишемо у вигляді

$$U_{вихM1} = \frac{U_{он1} \cdot K_{л1}}{e \cdot \left(\frac{dT(c)}{p(c)TZ} \left(\frac{K_{(v1)}^{B.П.} \cdot \rho_c^{B.П.} \cdot \Phi \cdot p_{в.н.макс} + \mu_{B.П.}}{+K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot \rho_c^{C.Г.} \cdot (p - \Phi \cdot p_{в.н.макс})} \right) \cdot \mu_{C.Г.} \right)} \cdot K_{Д1} \cdot K_{R1}. \quad (13)$$

Позначивши $\frac{K_{л1}}{K_{Д1} \cdot K_{R1}} = K_1$, отримаємо вираз:

$$\frac{U_{вихM1}}{U_{он1}} = \frac{K_1}{e \cdot \left(\frac{dT(c)}{p(c)TZ} \left(\frac{K_{(v1)}^{B.П.} \cdot \rho_c^{B.П.} \cdot \Phi \cdot p_{в.н.макс} + \mu_{B.П.}}{+K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot \rho_c^{C.Г.} \cdot (p - \Phi \cdot p_{в.н.макс})} \right) \cdot \mu_{C.Г.} \right)}. \quad (14)$$

Оскільки в аналізаторі закладений амплітудно-частотний принцип перетворення світлового сигналу, що проходить через газове середовище і контролюється, то зміна вихідної напруги $U_{вихM1}$ пропорційна частоті f_1 .

Зв'язок початкової F_0 та вимірювальної частоти f_1 описується виразом

$$\frac{U_{вихM1}}{f_1} = \frac{U_{01}}{F_{01}}, \quad (15)$$

де F_{01} – початкова (нульова) частота першого каналу.

Тоді для вимірювального каналу частота визначається таким чином:

$$f_1 = \frac{F_{01} \cdot e}{U_{он1} \cdot U_{01} \cdot K_1} \cdot \left(\frac{dT(c)}{p(c)TZ} \left(\frac{K_{(v1)}^{B.П.} \cdot \rho_c^{B.П.} \cdot \Phi \cdot p_{в.н.макс} + \mu_{B.П.}}{+K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot \rho_c^{C.Г.} \cdot (p - \Phi \cdot p_{в.н.макс})} \right) \cdot \mu_{C.Г.} \right). \quad (16)$$

В силу ідентичності опорного і вимірювального каналів для опорного каналу формула перетворення має такий вигляд:

$$f_2 = \frac{F_{02} \cdot e}{U_{он2} \cdot U_{02} \cdot K_2} \cdot \left(\frac{dT(c)}{p(c)TZ} \left(\frac{K_{(v1)}^{B.П.} \cdot \rho_c^{B.П.} \cdot \Phi \cdot p_{в.н.макс} + \mu_{B.П.}}{+K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot \rho_c^{C.Г.} \cdot (p - \Phi \cdot p_{в.н.макс})} \right) \cdot \mu_{C.Г.} \right). \quad (17)$$

Відносна вологість природного газу на підставі (16) та (17) визначається так:

$$\varphi = \frac{\mu_{в.н.} \cdot p_c \cdot TZ \cdot \left(K_{(v2)}^{C.Г.} \cdot \ln \frac{f_1 U_{01} K_1 U_{он1}}{F_{01}} - K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot \ln \frac{f_2 U_{02} K_2 U_{он2}}{F_{02}} \right)}{dT_c \cdot p_{в.н.(макс)} \cdot \rho_{в.н.(c)} \cdot \left(K_{(v1)}^{B.П.} \cdot K_{(v2)}^{C.Г.} - K_{(v1)}^{C.Г.} \cdot K_{(v2)}^{B.П.} \right)}. \quad (18)$$

Для проведення досліджень використовувалася вода, а сухий газ замінював уайт-спірит як вуглеводнеподібна сполука. Така заміна вимушена, оскільки зріджений газ при нормальних умовах використовувати немає можливості. Питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари визначалися згідно методики, описаної в [8]. Це дало змогу розрахувати залежність відносної вологості від частоти вимірювального та опорного каналу (18), графік якої наведено на рис. 1.

На підставі отриманої формули перетворення (18) і тривимірної залежності можна зробити висновок, що залежність вологості газу від зміни частоти носить лінійний характер завдяки використанню оберненого зв'язку. Максимальне відхилення розрахованих значень відносної вологості від значень, отриманих за допомогою залежностей із [2, 4] не перевищує 11%. Таке відносне відхилення дозволяє зробити висновок про можливе

використання запропонованої математичної моделі для подальшого створення аналізатора вологості.

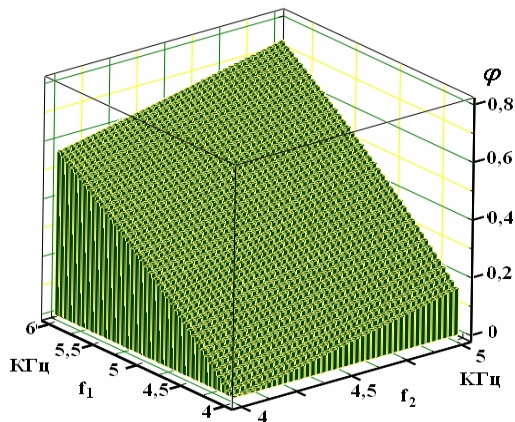


Рисунок 1 – Тривимірна залежність відносної вологості від частоти вимірювального та опорного каналу

Розроблено електричну функціональну схему аналізатора, що наведена на рис. 2 і складається з попереднього підсилювача, опорного та вимірювального каналів, мікропроцесора та індикаторного пристрою. На рис. 3 наведені осцилограми роботи сенсора та залежність зміни шпаруватості від вологості природного газу.

Фотоприймач VD перетворює імпульсний світловий сигнал в імпульсний електричний сигнал такої ж тривалості (рис. 3, діаграма №1, „Вологість „0”, позиція VD). Імпульсний електричний сигнал від фотоприймача VD надходить на підсилювач DA1.1 попереднього підсилювача, на виході якого перетворюється в трикутний сигнал з такою ж шпаруватістю (рис. 3, діаграма №1, „Вологість „0”, позиція DA1.1). Електричний сигнал надходить до підсилювача DA1.2, підсилюється та перетворюється у розтягнутий трикутний сигнал (рис. 3, діаграма №1, „Вологість „0”, позиція DA1.2), який надходить на вхід підсилювача DA2, де знову підсилюється та перетворюється в постійний електричний сигнал (рис. 3, діаграма №1, „Вологість „0”, позиція DA2). Далі електричний сигнал з підсилювача DA2 надходить на комутатори K1 та K2.

Оскільки по команді з мікропроцесора відкритий комутатор K1, тобто працює опорний канал, то електричний сигнал з підсилювача DA2 надходить на підсилювач регулятор діапазону опорного каналу DA3. На цьому підсилювачі формується електричний сигнал, який на компараторі DA4 порівнюється з реперним сигналом від джерела живлення. Після порівняння різницею позитивний сигнал підсилюється компаратором DA4 до рівня 1 V та надходить на вхід АЦП мікропроцесора DD1.

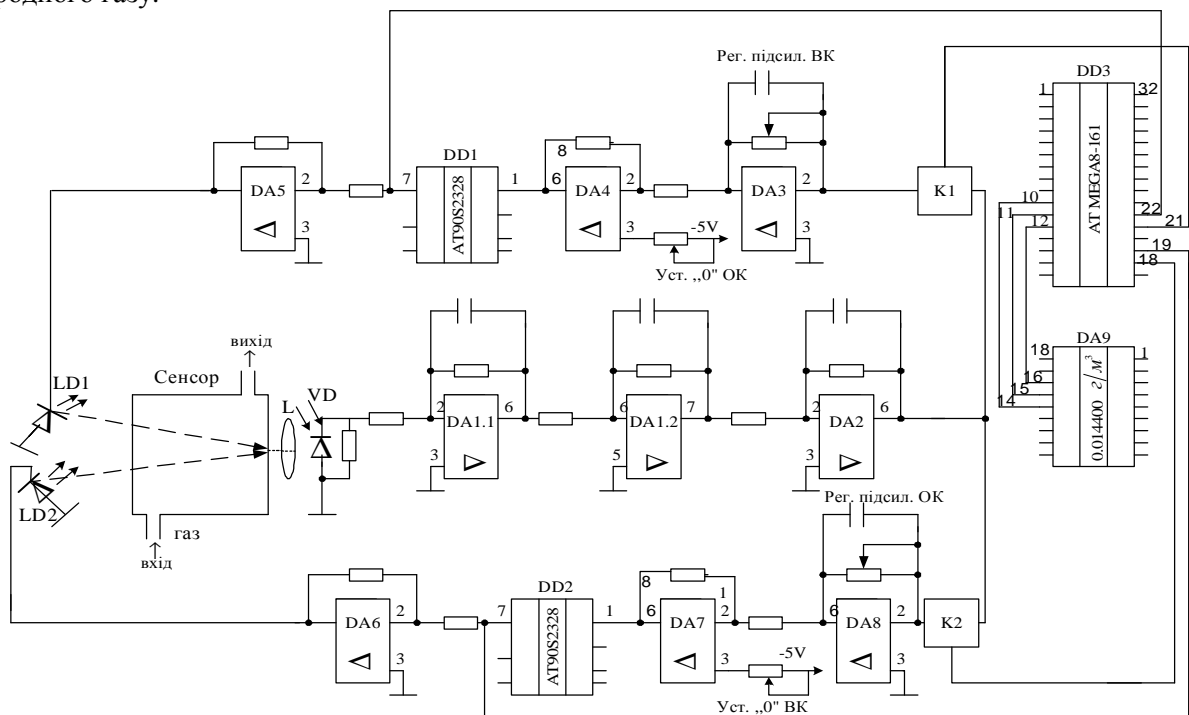


Рисунок 2 – Електрична функціональна схема аналізатора вологості природного газу

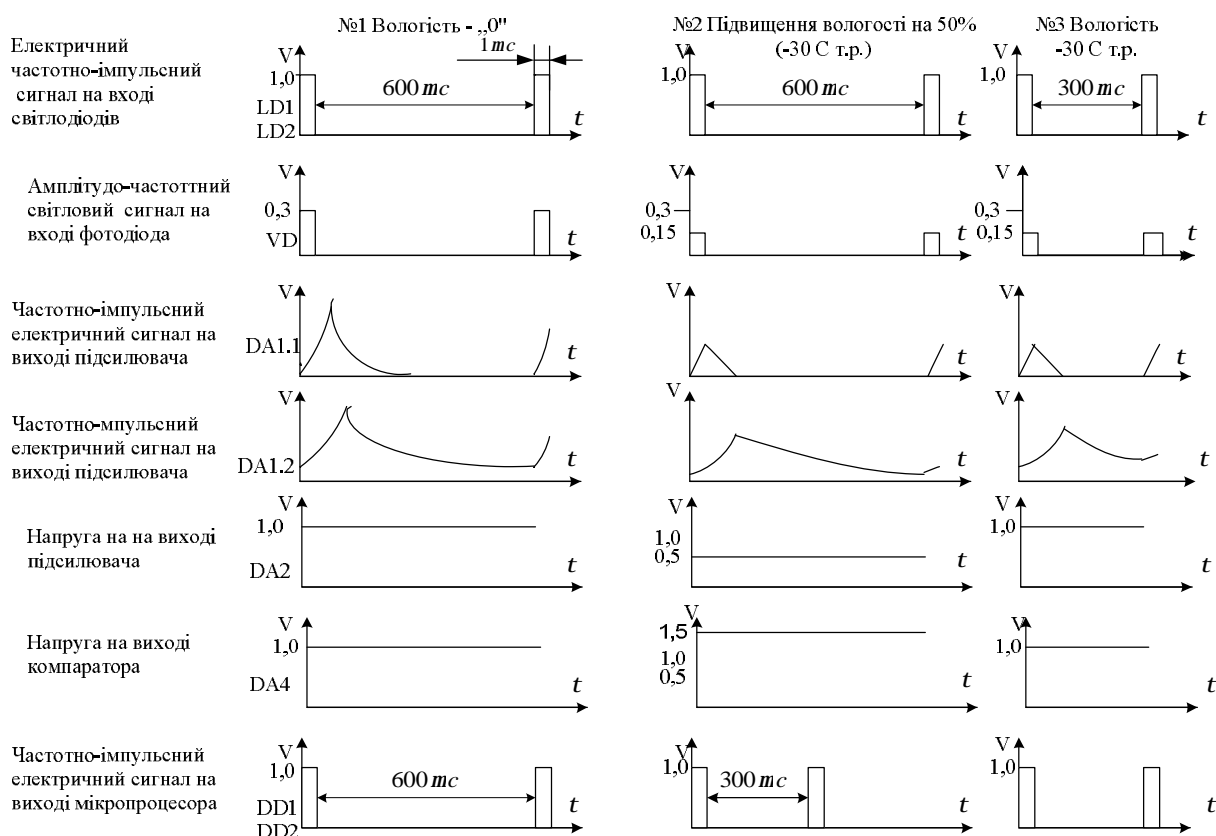


Рисунок 3 – Осцилограми роботи сенсора та залежності зміни шпаруватості від вологості природного газу

При подачі на мікропроцесор DD1 електричного сигналу на рівні 1 V він виробляє імпульсний сигнал тривалістю 1 μs з тривалістю паузи 600 μs (4000 Гц) (рис. 3, діаграма №1, „Вологість „0””, позиція DD1), який потрапляє на вхід підсилювача потужності, де перетворюється на імпульсний струмовий сигнал. Струмовий сигнал вмикає світлодіод LD1, тобто перетворює електричний імпульсний сигнал в імпульсний світловий сигнал.

Тобто компаратор DA4 та мікропроцесор DD1 встановлюють і підтримують електричний сигнал з амплітудою 1 В, частотою 4000 Гц, тривалістю 1 μs та тривалістю паузи 600 μs при вологості природного газу „0%”.

З наведеного вище видно, що опорний канал охоплений глибоким від’ємним зворотнім зв’язком.

З виходу мікропроцесора DD1 імпульсний частотний сигнал відводиться на мікропроцесор DD3, де запам’ятовується в частотному вигляді. За сигналом внутрішнього таймера мікропроцесора DD3 відключається комутатор K2, тобто вмикається вимірювальний канал. Він працює аналогічно опорному каналу і також

охоплений глибоким від’ємним зворотнім зв’язком. З виходу мікропроцесора DD2 імпульсний частотний сигнал вимірювального каналу подається на мікропроцесор DD3, де запам’ятовується в частотному вигляді та порівнюється з частотним сигналом опорного каналу. Після порівняння інформація обробляється та видається на індикаторний пристрій, який відображає величину вологості природного газу. В даному випадку величина вологості дорівнює „нулю”.

У вимірювальну кювету закачується природний газ з рівнем вологості, який складає 50% діапазону аналізатора. В початковий момент імпульсний електричний сигнал не змінюється, тобто величина електричного сигналу становить 1 В, а тривалість паузи складає 600 μs (рис. 3, діаграма №2, позиція LD1).

Розглянемо проходження електричного сигналу при ввімкненні вимірювального каналу. При проходженні імпульсного світлового сигналу через вимірювальну кювету з вологим природним газом на фотоприймач VD прийде послаблений світловий сигнал. Фотоприймач

VD перетворює послаблений імпульсний світловий сигнал в імпульсний електричний сигнал з амплітудою, зменшеною на 50% (рис. 3, діаграма №2, позиція VD).

Підсилювачі DA1.1 та DA1.2 підсилюють зменшений на 50% електричний сигнал (рис. 3, діаграма №2, позиції DA1.1 та DA1.2).

Підсилювач DA2 підсилює та перетворює імпульсний електричний сигнал в постійний на рівні, який на 50% менший відносно нульової вологості. Також зменшений по величині постійний електричний сигнал з підсилювача DA8 надходить на компаратор DA7. Компаратор видає на АЦП мікропроцесора DD2 сигнал, вище 1 V (+ 1,5 В), що призводить до розбалансування пристрою порівняння цифрових сигналів мікропроцесора DD2 і, відповідно, до збільшення частоти слідування імпульсних сигналів на виході мікропроцесора DD2 (рис. 3, діаграма №3, позиція DD2).

Імпульсний електричний сигнал у підсилювачі DA6 перетворюється у струмовий імпульсний електричний сигнал такої ж шпаруватості (300 μ s) та запалює світлодіод LD2.

Світловий потік від світлодіода LD2 проходить через кювету з вологим газом, послаблюється і потрапляє на фотоприймач VD. Фотоприймач VD перетворює послаблений імпульсний світловий сигнал в електричний імпульсний сигнал зі шпаруватістю 300 μ s та амплітудою імпульсів, послабленою на 50% (рис. 3, діаграма №3, позиції LD1 та VD). При проходженні імпульсного електричного сигналу тривалістю паузи 300 μ s через підсилювачі DA1.1 та DA1.2, сигнал, аналогічно перетворюється в постійний електричний сигнал, але вже з величиною напруги на рівні „Вологість „0” (рис. 3, діаграма №3, позиція DA2).

Постійний електричний сигнал через комутатор K2 надходить на підсилювач регулятор діапазону DA8. З підсилювача DA8 постійний електричний сигнал надходить на компаратор DA7, з виходу якого на АЦП мікропроцесора DD2 надходить постійний електричний сигнал, величиною 1 В. Це відновлює розбалансування пристрою порівняння мікропроцесора DD2, що підтримує тривалістю паузи слідування імпульсів на рівні 300 μ s чи з частотою 7000 Гц (8000 Гц).

З виходу мікропроцесора DD2 частотний сигнал надходить на мікропроцесор DD3, де запам'ятовується його рівень.

По сигналу таймера мікропроцесора DD3 відключається комутатор K2 і вмикається комутатор K1, тобто вмикається опорний канал.

Оскільки на довжині хвилі 1330 нм відбувається незначне (на рівні 5÷7%) послаблення світла, що проходить через середовище з вологим природним газом, то зміна частоти слідування імпульсів також незначна.

Змінений частотний сигнал з опорного каналу надходить на мікропроцесор DD3, де запам'ятовується та порівнюється зі змінним частотним сигналом вимірювального каналу. Отриманий після порівняння сигнал обробляється і надходить на індикаторний пристрій, який і відображає величину вологості природного газу.

ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель інфрачервоного аналізатора вологості газу на основі використання частотно-імпульсної модуляції, яка, на відміну від амплітудної модуляції, забезпечує стабільну роботу оптико-електронної системи.

Проведено дослідження, які показали, що залежність вологості газу від зміни частоти носить лінійний характер завдяки використанню оберненого зв'язку.

Запропоновано функціональну схему аналізатора вологості, в якій використання двохвильової системи дозволило підвищити точність вимірювання завдяки відсутності необхідності додаткових вимірювань молярної маси досліджуваного газу та його тиску.

Отримано осцилограми роботи сенсора та залежності зміни шпаруватості від вологості природного газу. Встановлено, що підвищення вологості веде до зменшення шпаруватості частотно-імпульсного сигналу на виході мікропроцесора, завдяки чому інтегральне значення напруги на виході фотоприймальної системи залишається постійною величиною.

1. Селезнев С.В. *Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа* / С.В.Селезнев // *Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : научно-технический сб.* – 2005. – №2. – С. 10-22.
2. Андрійшин М.П. *Вимірювання витрат та кількості газу: Довідник* / М.П. Андрійшин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш [та ін.]. – Івано-Франківськ: ПП «Сімік», 2004. – 160 с.
3. Берлинер М. А. *Измерения влажности.* / М. А. Берлинер – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
4. Пеклер В. В. *Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения* / В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов // *Датчики и системы.* – 2006. – №1. – С. 33-38.
5. Мухитдинов М. *Оптические методы и*

устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 6. Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й.Й. Білінський, В.В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №5. – С.18-22. 7. Білінський Й. Й. Підвищення чутливості аналізатора вологості газу / Й.Й. Білінський, О.С. Городецька, В.В. Онушко // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – №25. – С.51-54. 8. Білінський Й. Й. Математична

модель аналізатора вологості природного газу [електронний ресурс]/ Й. Й. Білінський, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ – 2010.–№4. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-4/uk.htm>.

Поступила в редакцію 08.06.2011 р.

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Філінюк М.А.**