

## ПРИЛАДИ І МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ РЕЧОВИНИ

УДК 693.54

В. Ю. КУЧЕРУК, І. А. ДУДАТЬСВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

### МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ВОЛОГОСТІ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

**Анотація:** Синтезована функціональна схема системи вимірювання концентрації димових газів котельних установок з додатковим вимірювальним каналом визначення вологості газу. Представлена математична модель аналізатора вологості газових сумішей, в основу якої покладено метод абсорбційної спектроскопії, в якому лежить явище вибіркового поглинання багатоатомними молекулами випромінювання при його проходженні через газове середовище. Наведено структурну схему двоканального аналізатора вологості, яка побудована на основі оптичних схем введення ви-промінювання вимірювального та опорного каналів, світлодіодів, які випромінюють монохроматичне світло відповідної частоти, оптичних схем виведення випромінювання вимірювального та опорного каналів і фотоприймачів. Отримані нові, науково-обгрунтовані теоретичні та практичні результати, які є істотними для підвищення достовірності при необхідній швидкодії процесу контролю складу димових газів котельних установок на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу з компенсацією дестабілізуючих факторів інфрачервоного перетворювача, за рахунок введення додаткового аналізатора вологості.

**Ключові слова:** статична характеристика, динамічна характеристика, перехідний процес, димовий газ, газоаналітична система, дестабілізуючі фактори, компенсаційний вимірювальний канал.

**Аннотация:** Разработана функциональная схема системы измерения концентрации димовых газов котельных установок с дополнительным измерительным каналом определения влажности газа. Представленная математическая модель анализатора влажности газовых смесей, в основу которой положен метод абсорбционной спектроскопии, в котором лежит явление выборочного поглощения многоатомными молекулами излучения при его прохождении через газовую среду. Приведена структурная схема двухканального анализатора влажности, которая построена на основе оптических схем введения излучения измерительного и опорного каналов, светодиодов, которые излучают монохроматический свет соответствующей частоты, оптических схем выведения излучения измерительного и опорного каналов и фотоприемников. Получены новые, научно-обоснованные теоретические и практические результаты, которые являются существенными для повышения точности при необходимом быстродействии процесса контроля состава димовых газов котельных установок на основе оптико-абсорбционного инфракрасного метода с компенсацией дестабилизирующих факторов инфракрасного преобразователя, за счет введения дополнительного анализатора влажности.

**Ключевые слова:** статическая характеристика, динамическая характеристика, переходный процесс, димовой газ, газоаналитическая система, дестабилизирующие факторы, компенсационный измерительный канал.

**Annotation:** The functional diagram of the system of measuring of concentration of smoke gases of caldrion options is worked out with the additional measuring channel of determination of gas humidity. Presented mathematical model of analyzer of humidity of gas mixtures, the method of absorption spectroscopy, in which the phenomenon of selective absorption lies by the polyatomic molecules of radiation at his passing through an environment, is fixed in basis of which. A flow diagram over of twochannel analyzer of humidity, which it is built on the basis of optical charts of introduction of radiation of measuring and supporting channels, light-emitting diodes, which radiate monochromatic light of corresponding frequency, optical charts of leading out of radiation of measuring and supporting channels and приемчів, is brought. New, scientifically-reasonable theoretical and practical results which are substantial for the increase of exactness at the necessary fast-acting of process of control of composition of smoke gases of caldrion options on the basis of optic-absorption of infra-red method with indemnification of destabilizing factors of infra-red transformer are got, due to introduction of additional analyzer of humidity.

**Key words:** static description, dynamic description, transient, smoke gas, газоаналітична system, destabilizing factors, compensative measuring channel.

#### Вступ

Ефективність роботи котельних установок (КУ) прямо залежить від наявності достовірної інформації про хід технологічних процесів. Відсутність контролю-вимірювальної апаратури може спричинити неефективну роботу установок, зокрема неякісне згорання палива.

Під час аналізу вологості технологічних газів найбільш інформативною величиною, яка характеризує безпосередньо кількість води в заданому об'ємі, є абсолютна вологість або відносна вологість, що визначає споживчі властивості газів [1]. Контроль вологості димових газів котельних установок дає змогу оцінити: ступінь завершеності процесу згорання палива (втрат від хімічної неповноти горіння), умови згорання палива (коефіцієнт надлишку повітря), характер згорання палива в окремих зонах котла (наявність локальних низькотемпературних зон), динаміку процесу горіння. В свою чергу, визначення даних факторів дає змогу максимально точно корегувати співвідношення паливо-повітря на вході об'єкта.

#### Мета роботи

Метою роботи є підвищення швидкодії при необхідній достовірності контролю складу димових газів котельних установок на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу вимірювання.

#### Аналіз попередніх досліджень та публікацій

У роботі [2] представлено систему автоматичного керування котельною установкою у якій співвідношення "паливо-повітря" регулюється підсистемою контролю складу димових газів котельних установок. Підсистема контролю реалізована з закритим оптичним каналом, тобто проба, що аналізується, проходить через блок стабілізації входних параметрів (БСВП), яка очищує пробу від механічних домішок, зменшує до необхідного значення вологість суміші, стабілізує температуру та тис-

ку. На наступному етапі проба газу проходить через первинний та вторинний вимірювальні перетворювачі (ПВП та ВВП). Потім сигнал підсилюється до уніфікованого значення в основному підсилювачі і поступає в пристрій обробки інформації (ПОІ). У ПОІ здійснюється перетворення змінного електричного сигналу у значення концентрації компонента димового газу у %, відповідно функціональній залежності, в основі якої лежить закон поглинання Ламберта-Бера:

$$I_{вих} = a \cdot [1 - \exp(-b \cdot \varphi)], \quad (1)$$

де  $I_{вих}$  – вихідний електричний сигнал (струм),  $a, b$  – постійні,  $\varphi$  - масова концентрація компонента газової суміші.

Одже, завдяки введеному у склад газоаналітичної системи (ГС) БСВП компенсуються вище перераховані дестабілізуючі фактори. Але існує неоднозначність: при зменшенні статичної складової похибки збільшується динамічна складова (при проходженні проби через БСВП (1)), і навпаки при зменшенні динамічної складової збільшується статична складова (з відкритим оптичним каналом (2)).



Рисунок 1 – Шляхи подачі димового газу на ГС, для його аналізу

Дійсно, похибка в усталеному режимі є статичною похибкою. Наявність перехідного процесу зумовлює динамічну похибку. Тривалість перехідного процесу при заданій динамічній похибці визначають з рівняння [3]:

$$\Delta_{дн} = k \cdot e^{-\left(\frac{t_{ппр}}{\tau}\right)}, \quad (2)$$

де  $t_{ппр}$  – тривалість перехідного процесу,  $\tau$  – стала часу,  $\Delta_{дн}$  – динамічна похибка засобу вимірювання,  $k$  – коефіцієнт передачі.

З останнього рівняння тривалість перехідного процесу при заданому значенні динамічної похибки визначається за формулою:

$$t_{ппр} = \tau \cdot \ln\left(\frac{k}{\Delta_{дн}}\right). \quad (3)$$

Таким чином, у засобах вимірювань з аперіодичним перехідним процесом, який описується перехідною першого порядку, динамічна похибка зменшується разом із зменшенням тривалості перехідного процесу. Протікання перехідного процесу уВП після зміни концентрації газової суміші представлено на рис. 2 та рис. 3. Перехідна характеристика  $h(t)$  побудована в середовищі символічної математики Maple VI.

При  $t \approx$  від 0 до 4,5 с (рис.2) – це час, затрачений на транспортування проби та обумовлений інерційністю елементів ГС. При  $t \approx$  від 0 до 3 с (рис. 3) – це час, обумовлений інерційністю елементів ГС.

Отже, існує проблема  $\Delta_{дн1} > \Delta_{дн2}$  при  $\Delta_{ст1} < \Delta_{ст2}$ , і, навпаки,  $\Delta_{дн1} < \Delta_{дн2}$  при  $\Delta_{ст1} > \Delta_{ст2}$ .

Розв’язок даної проблеми розпочато у [4], де у ГС введено додатковий канал компенсації температурної похибки. В результаті з БСВП було видалено блок стабілізації температури, а вихідний сигнал з ГС обраховується як  $U_{вих} = U(\varphi) + U(T) + U'(T)$ , де  $U_{вих}$  – загальний вихідний сигнал з вимірювального каналу,  $U(\varphi)$  – частка вихідного сигналу від концентрації компонента газової суміші,  $U(T)$  – температурна похибка оптичного перетворення виражена через паразитну напругу,  $U'(T)$  – сигнал з компенсаційно-

го температурного датчика. Таким чином, температурна похибка знижувалась програмним шляхом при забезпеченні умови  $U(T) = -U'(T)$ .

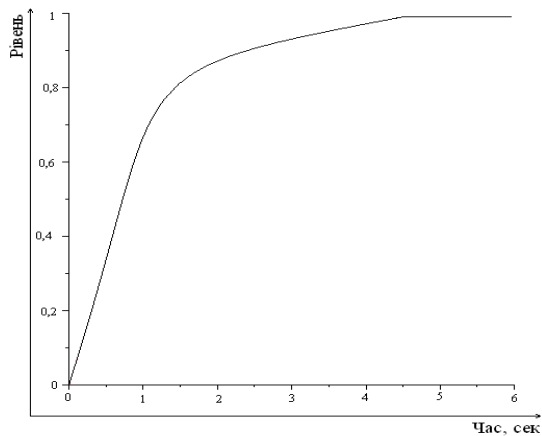


Рисунок 2 – Перехідний процес у ВП з закритим оптичним каналом

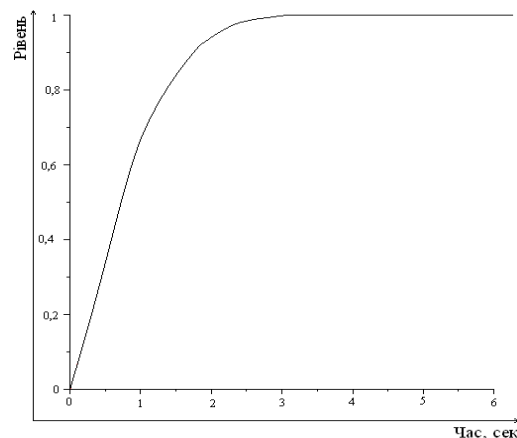


Рисунок 3 – Перехідний процес у ВП з відкритим оптичним каналом

### Основна частина

Інфрачервону радіацію поглинають всі гази, за винятком  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $Cl_2$  і одноатомних газів. Спектр поглинання одноатомних газів або пари металів відрізняється від інфрачервоних спектрів поглинання молекул своєю відносною простотою і складається не із смуг, а з окремих ліній, у багатьох випадках розташованих тільки в ультрафіолетовій області спектру. Смуги поглинання димового газу інфрачервоною радіацією представлено на рис. 4.

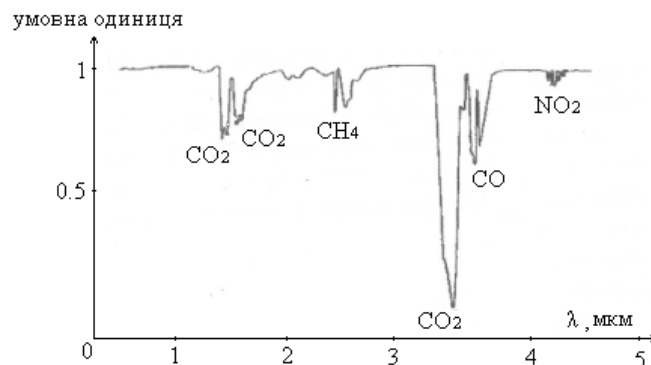


Рисунок 4 – Коливально-обертальні смуги поглинання димового газу ІЧ випромінюванням

Сума основних компонентів димових газів визначається по формулі 5 (решта компонентів димових газів є на рівні мікроконцентрацій і практично не впливають на визначення втрат тепла)

$$\mu(O_2) + \mu(NO_2) + \mu(CO_2) + \mu(CH_4) + \mu(CO) + \mu(H_2O) + \text{сажа} = 100\%, \quad (5)$$

де  $\mu(X)$  – масова концентрація газової суміші у відсотках.

Оптимізацію процесу спалювання пропонується вести за компонентом –  $O_2$ . Це дає змогу максимально точно корегувати співвідношення паливо-повітря на вході об'єкта. Але фізично кисень не поглинається ІЧ випромінюванням (це видно з рис. 5, де ліній поглинання кисню взагалі немає), тому пропонується визначати  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$  практично, а  $O_2$  – аналітично (при вилученні з БСВП блока стабілізації температури проби та блока осушки проби)

$$\mu(O_2) = 100\% - [\mu(NO_2) + \mu(CO_2) + \mu(CO) + \mu(CH_4) + \mu(H_2O)]. \quad (6)$$

У роботі [1] розроблено математичну модель аналізатора вологості газових сумішей. На основі експериментальних досліджень визначено, що аналізатор відповідає таким вимогам: швидкий відгук, відсутність впливу агресивних домішок, а також перевертання результатів вимірювання газу від впливу спиртових з’єднань, низька похибка та висока відтворюваність результатів вимірювання.

В основу аналізатора покладено метод абсорбційної спектроскопії, в якому лежить явище вибіркового поглинання багатоатомними молекулами випромінювання при його проходженні через середовище.

Запропонований аналізатор вологості, який містить два рівноцінних канали: перший – вимірювальний, налаштований на робочу довжину хвилі ( $\nu_1$ ), другий – на опорну ( $\nu_2$ ). Абсолютна вологість газу визначається за формулою

$$\varphi = \frac{\mu_{e.n.} p_c T Z \cdot \left( K_{(\nu_2)}^{C.G.} \ln \frac{f_1 U_{01} K_1 U_{on1}}{F_{01}} - K_{(\nu_1)}^{C.G.} \ln \frac{f_2 U_{02} K_2 U_{on2}}{F_{02}} \right)}{dT_c p_{e.n.(max)} \left( K_{(\nu_1)}^{B.П.} \cdot K_{(\nu_2)}^{C.G.} - K_{(\nu_1)}^{C.G.} \cdot K_{(\nu_2)}^{B.П.} \right) \cdot \rho_{e.n.(c)}}, \quad (7)$$

де  $\varphi$  – абсолютна вологість газу;  $\mu_{e.n.}$  – молекулярна маса водяної пари;  $p_c$ ,  $T_c$  – тиск і температура газу за стандартних умов;  $T$  – температура газу;  $Z$  – коефіцієнт стисливості;  $K_{(\nu)}^{C.G.}$ ,  $K_{(\nu)}^{B.П.}$  – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари на частоті  $\nu$  відповідно;  $f_1$ ,  $f_2$  – частота вимірювального і опорного каналів;  $U_{on1}$ ,  $U_{on2}$  – опорна напруга першого і другого каналів, яка виставляється як початкова освітленість фотоприймача;  $F_{01}$ ,  $F_{02}$  – початкова (нульова) частота першого і другого каналів;  $K_1$ ,  $K_2$  – коефіцієнти перетворення першого і другого каналів;  $d$  – товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла  $I_0$ ;  $p_{e.n.(max)}$  – максимальний тиск водяної пари;  $\rho_{e.n.}^{B.П.}$  – густина водяної пари за стандартних умов.

Проведено дослідження, які показали, що залежність вологості газу від зміни частоти носить лінійний характер завдяки використанню оберненого зв’язку. Перевагою розробленої математичної моделі є те, що за її допомогою можна визначити абсолютну вологість газу без урахування густини суміші газів, його молекулярної маси, тиску.

На рис. 5 наведено структурну схему двоканального аналізатора вологості. Сенсор складається з корпусу, оптичних схем виведення випромінювання вимірювального та опорного каналів, світлодіодів, які випромінюють монохроматичне світло відповідної частоти, оптичних схем виведення випромінювання вимірювального та опорного каналів і фотоприймачів.

Корпус аналізатора представляє собою трубу, діаметр якої зумовлений габаритними розмірами оптичної системи, що забезпечує оптимальні параметри світлового потоку.

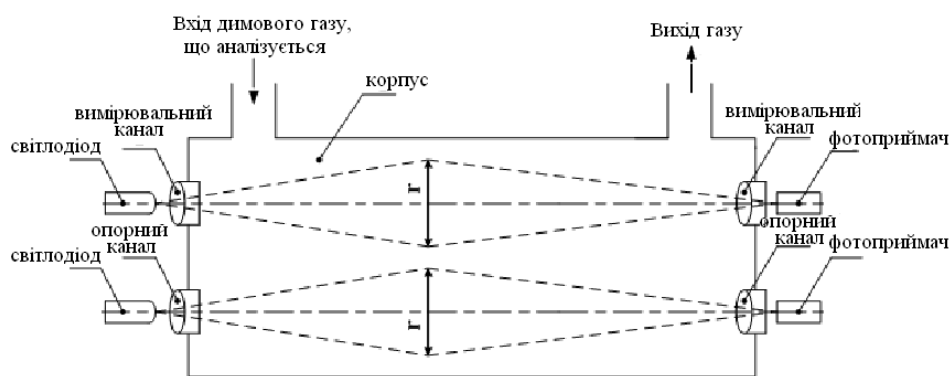


Рисунок 5 – Аналізатор вологості

Використаємо даний аналізатор, як окремий вимірювальний канал у системі контролю складу димових газів котельних установок. Синтезована функціональна схема системи контролю представлена на рис. 6.

За формулою (7) обчислюється кількість водяної пари, яка фактично міститься в  $1\text{ м}^3$  повітря (газової суміші), та обчислюється у одиницях  $[\text{г}/\text{м}^3]$ . Сумарний об’єм кювет (для представленої ГС), що використовуються для визначення компонента газової суміші дорівнює,  $0,02 [\text{г}/\text{м}^3]$ . На наступному

етапі об'єм кювет приймаємо як 100%, а вимірне  $0,02\varphi - x\%$ . Розв'язавши пропорцію, отримаємо значення  $\varphi_{H_2O}$  яке можна підставляти у основні формули (5 та 6).

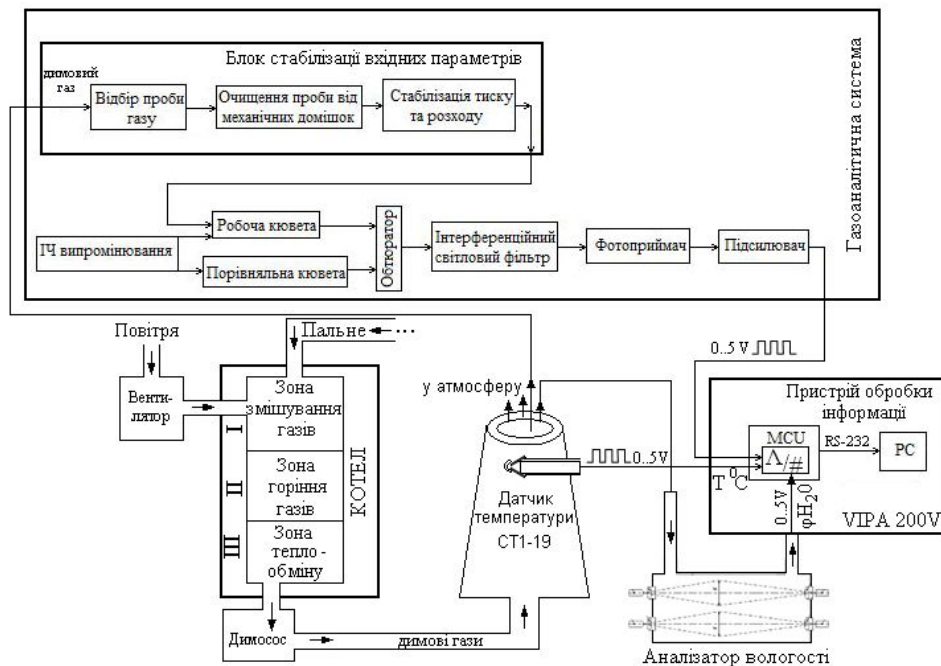


Рисунок 6 – Газоаналітична система

Для компенсації температурної похибки використовуємо напругу (В), а вологості безпосередньо кількість у заданому об'ємі (%). У подальшому планується дослідити вплив механічних домішок на результати вимірювання концентрації та розробити метод компенсації даних факторів підвищивши швидкість при необхідній точності контролю складу димових газів котельних установок.

#### Висновок

Отримані нові, науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, які є істотними для підвищення достовірності при необхідній швидкодії процесу контролю складу димових газів котельних установок на основі оптико-абсорбційного інфрачервоного методу з компенсацією дестабілізуючих факторів інфрачервоного перетворювача, за рахунок введення додаткового аналізатора вологості.

#### Список літератури

1. Білинський Й.Й., Онушко В.В. Математична модель аналізатора вологості газу. / Й.Й. Білинський, В.В. Онушко // Наукові праці ВНТУ. – м. Вінниця, 2010. – №4.
  2. Кучерук В.Ю., Дудатьєв І.А. Ресурсоенергозбережна система автоматичного керування котельною установкою з контролем складу димових газів / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Вісник інженерної академії України. – м. Київ, 2010. – №3-4. – С. 98-103.
  3. Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. Навчальний посібник. – Вінниця ВДТУ, 2001.
  4. Кучерук В.Ю., Дудатьєв І.А. Метод компенсації температурної похибки оптико-абсорбційних температурних перетворювачів концентрації газової суміші / В.Ю. Кучерук, І.А. Дудатьєв // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 2011. – №1 (21). – С. 163-167.
- Стаття надійшла: 05.03.12.

#### Відомості про авторів

**Кучерук Володимир Юрійович** – д.т.н., професор, зав. кафедри метрології та промислової авто-матики. Вінницький національний технічний університет; 21021 м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95; тел. (0432)598672; e-mail: kucheruk@mail.ru.

**Дудатьєв Ігор Андрійович** – аспірант кафедри метрології та промислової автоматики. Вінницький національний технічний університет; 21021 м.Вінниця, Хмельницьке шосе, 95; тел. (0432)598672; e-mail: dudatiev@mail.ru.