

Я. О. Осадчук
О. В. Осадчук
К. В. Шикун
В. І. Петренко

ЗАСІБ ВИМІРЮВАННЯ ГАЗОВОГО СКЛАДУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНОГО СЕНСОРА З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано і досліджено параметричний автогенераторний сенсор концентрації газу на основі транзисторних напівпровідникових структур з диференційним від'ємним опором з газочутливим елементом на базі резистора, причому газочутливий елемент є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію приладу. На основі розгляду фізичних процесів, які протікають у газочутливих елементах і автогенераторних приладах, на основі методу перетворення енергії, розроблено параметричні залежності функцій чутливості і перетворення. Доведено, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу, що в свою чергу викликає зміну еквівалентної ємності та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних приладів вимірювання концентрації газу, що змінює вихідну частоту приладів. Чутливість приладу змінюється від 1,48 кГц/ррт до 2,05 кГц/ррт при зміні концентрації газу від 0 ррт до 2000 ррт в діапазоні частот 1185 МГц.

Ключові слова: параметричний автогенераторний сенсор концентрації газу, перетворювач з частотним виходом, газочутливий елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

DEVICE FOR MEASURING THE GAS COMPOSITION OF THE ENVIRONMENT BASED ON A PARAMETRIC SENSOR WITH A FREQUENCY OUTPUT SIGNAL FOR IOT SYSTEMS

Abstract

A parametric self-oscillating gas concentration sensor based on transistor semiconductor structures with differential negative resistance with a gas-sensitive element based on a resistor has been proposed and investigated, with the gas-sensitive element being the active elements of the self-oscillating circuit, which simplifies the design of the device. Based on the consideration of the physical processes occurring in gas-sensitive elements and self-oscillating devices, based on the energy conversion method, parametric dependences of the sensitivity and conversion functions have been developed. It has been proven that the main contribution to the change in the conversion and sensitivity functions is made by a change in the gas concentration, which in turn causes a change in the equivalent capacitance and differential negative resistance in the oscillatory system of self-oscillating devices for measuring gas concentration, which changes the output frequency of the devices. The sensitivity of the device changes from 1.48 kHz/ppm to 2.05 kHz/ppm when the gas concentration changes from 0 ppm to 2000 ppm in the frequency range of 1185 MHz.

Keywords: parametric self-oscillating gas concentration sensor, frequency output transducer, gas-sensing element, conversion function, sensitivity equation.

Забруднення повітря широко визнано однією з найзначніших екологічних загроз для здоров'я населення світу. Серед ключових забруднювачів $PM_{2.5}$ та CO_2 викликають особливе занепокоєння через їхні мікроскопічні розміри, тривалий час перебування в атмосфері та хронічний вплив на здоров'я. Тривалий вплив цих забруднювачів може призвести до серцево-судинних захворювань, астми та респіраторних ускладнень, багато з яких не виявляються одразу [1–3]. Тому постійний та точний моніторинг якості повітря є життєво важливим для оцінки рівнів забруднювачів та впровадження ефективних стратегій пом'якшення наслідків [4]. Забруднення повітря в приміщеннях є особливо актуальною проблемою, оскільки люди проводять майже 90% свого часу в приміщенні, де концентрація забруднювачів часто в два-чотири рази вища, ніж на вулиці [3–5]. Емпіричні дослідження

показали, що рівень $PM_{2.5}$ у приміщенні безпосередньо пов'язаний з ризиками для здоров'я дихальних шляхів та серцево-судинної системи. Однак традиційні станції моніторингу якості повітря еталонного класу, хоча й мають високу точність, є дорогими та зазвичай обмеженими в просторовому охопленні, особливо в регіонах з низьким та середнім рівнем доходу. У відповідь на ці обмеження, LCS стали практичною альтернативою завдяки своїй доступності, компактному форм-фактору та легкості інтеграції [6]. Ці сенсори дозволяють створювати щільні мережі моніторингу, здатні фіксувати дрібномасштабні зміни якості повітря з плином часу та простору [7].

Інтеграція LCS у системи Інтернету речей ще більше посилює їхню корисність. Системи на основі Інтернету речей дозволяють збирати дані в режимі реального часу, здійснювати бездротовий зв'язок, хмарне зберігання та здійснювати віддалений доступ [8]. Таке поєднання дозволяє створювати інтелектуальні платформи моніторингу якості повітря, які є масштабованими, економічно ефективними та підходять для міського, промислового та житлового середовища.

Незважаючи на свої переваги, пристрої LCS стикаються з проблемами точності вимірювань та чутливості до навколишнього середовища, особливо до таких факторів, як температура та вологість, які можуть суттєво впливати на стабільність сенсорів та надійність даних [9].

Характеристики сенсорів газу визначають точність і надійність систем управління і регулювання приладів контролю технологічних процесів, безпеку роботи установок в хімічній промисловості, ядерній енергетиці, нафтогазовій промисловості, у наукових дослідженнях, у військовій техніці тощо. Тому для сенсорів газу висуваються жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити, вагу та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ та мати можливість виготовлення за стандартною інтегральною технологією [9, 10].

На теперішній день існуючі напівпровідникові сенсори газу не задовольняють вищезначеним вимогам. Перспективним науковим напрямком, що дозволяє усунути недоліки існуючих аналогових сенсорів газу, є створення автогенераторних приладів, які реалізують принцип перетворення «концентрація газу – частота» на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором [10 – 12].

Подальший розвиток науки і техніки потребує конструкцій приладів вимірювання концентрації газу на основі мікроелектронної технології, що значно покращує метрологічні показники приладів фізичних величин. Прилади вимірювання газу використовуються для аналізу широкого спектру газів в різноманітних галузях науки, промисловості та техніки. Основними величинами, що характеризують концентрацію газів є вагова концентрація, яка визначається відношенням маси вимірюваного газу до маси всієї суміші газів, в якій знаходиться вимірюваний газ. Молярною концентрацією вимірюваного газу називається відношення кількості молей цього газу до кількості молей всіх газів у суміші. Концентрація газів також вимірюється у відсотках або в мільйонних частках, що характеризується величиною ppm, де $1\text{ppm}=10^{-6}=10^{-4}\%$. Вимірюється концентрація газів ґрунтується на основі парціального тиску. Під парціальним тиском вимірюваного у суміші розуміють тиск, під яким знаходився б цей газ, якби з суміші були вилучені всі інші гази, а об'єм та температура залишилися сталими. Прилад вимірювання концентрації газу з частотним виходом базується на основі напівпровідникової транзисторної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій газочутливим елементом є резистор (рис.1).

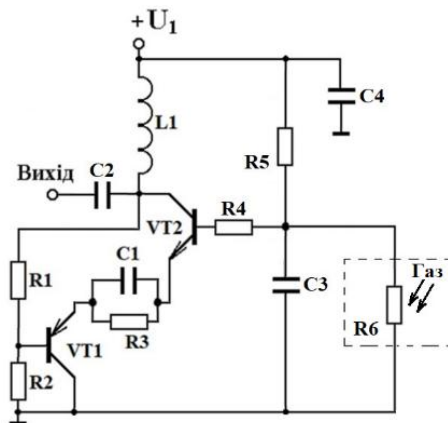


Рис. 1. Еквівалентна схема параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу

Параметричний автогенераторний сенсор концентрації газу складається з біполярних транзисторів VT1 і VT2 з електронним і дірковим типом провідності, що забезпечує існування диференційного від'ємного опору на спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу, резисторів R1-R5, конденсатора C4 та пасивної індуктивності L1. Коливальний контур пристрою утворений еквівалентною ємністю повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів VT1 і VT2 та пасивної індуктивності L1. На газочутливий резистор R6 діє концентрація газу, що приводить до зміни як еквівалентної ємності коливального контуру параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу, так і диференційного від'ємного опору на виході вимірювального пристрою, що викликає зміну резонансної частоти параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу. Втрати енергії в коливальному контурі параметричного автогенераторного сенсора компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Резистори R1-R5 здійснюють живлення параметричного автогенераторного сенсора за допомогою джерела постійної напруги U1. Конденсатор C4 запобігає протіканню змінного струму через блок живлення.

Чутливість приладу визначається похідною функції (1) за параметром концентрації газу W . Як показали експериментальні дослідження, вихідна змінна напруга $U_{\sim}$ параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу також залежить від концентрації газу. Таким чином, функція перетворення параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу з врахуванням залежності її складових від концентрації газу приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[a_5 U_{\sim}^2(W) e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} - a_6 U_{\sim}^4(W) e^{\varphi_{sn}(W)} \right]^{1/2}. \quad (1)$$

$$a_5 = \frac{qn_i \mu_{ns} L_D (\gamma^{-1} + \alpha)^{1/2}}{4\eta I_p^2 L}. \quad (2)$$

$$a_6 = \frac{q^2 n_i^2 \mu_{ns}^2 L_D^2 (\gamma^{-1} + \alpha)}{16\eta^2 t^2 I_p^4 R_g^2}. \quad (3)$$

На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової і експериментальної кривих функції перетворення параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу при зміні концентрації вуглекислого газу (CO₂) від 0 ppm до 2000 ppm.

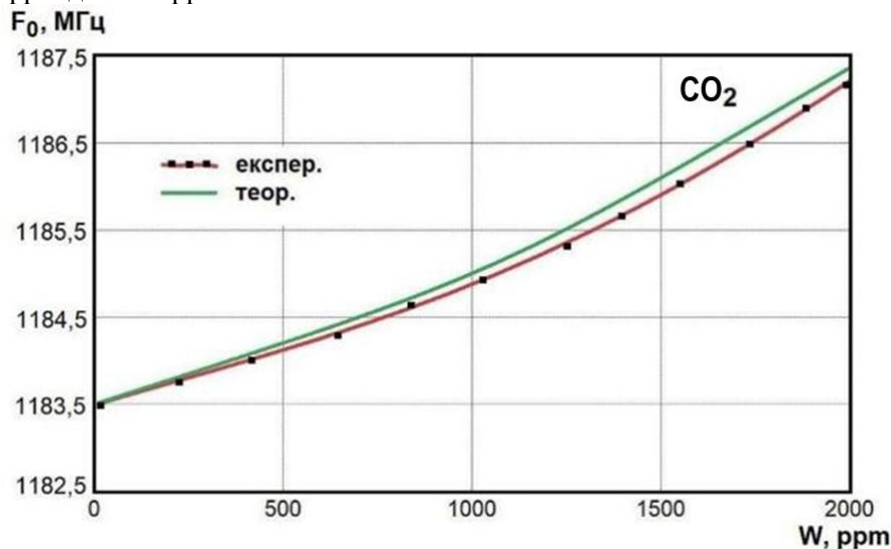


Рис. 2. Залежність функції перетворення від концентрації газу

З врахуванням виразів (1) – (3), функція чутливості параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[a_5 U_{\sim}^2(W) e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} - a_6 U_{\sim}^4(W) e^{\varphi_{sn}(W)} \right]^{-1/2} \times \left[\left(2a_5 U_{\sim}(W) \frac{dU_{\sim}(W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} a_5 U_{\sim}^2(W) \frac{d\varphi_{sn}(W)}{dW} e^{\frac{\varphi_{sn}(W)}{2}} \right) - \left(4a_6 U_{\sim}^3(W) e^{\varphi_{sn}(W)} \frac{dU_{\sim}(W)}{dW} + a_6 U_{\sim}^4(W) e^{\varphi_{sn}(W)} \frac{d\varphi_{sn}(W)}{dW} \right) \right] \quad (4)$$

Графік розрахункової і експериментальної залежності функції чутливості параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу при зміні концентрації вуглекислого газу (CO₂) від 0 ppm до 2000 ppm подано на рис. 3.

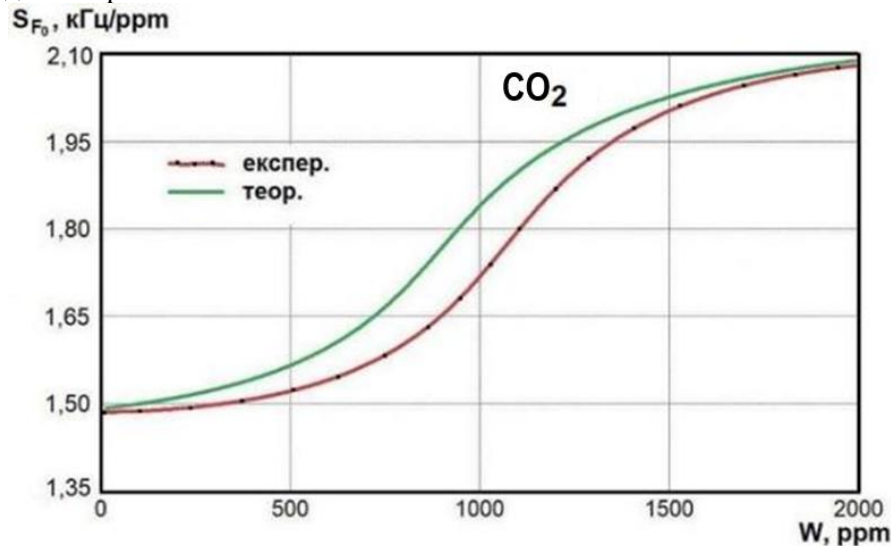


Рис. 3. Залежність функції чутливості від зміни концентрації газу

Як видно з графіка (рис.3), чутливість параметричного автогенераторного сенсора концентрації газу змінюється від 1,48 кГц/ppm до 2,05 кГц/ppm в діапазоні частот від 1183,5 МГц до 1187,2 МГц.

ВИСНОВКИ

Запропоновано параметричний автогенераторний сенсор концентрації газу на основі транзисторних напівпровідникових структур з диференційним від'ємним опором з газочутливими елементами на базі резистора, причому газочутливий елемент є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію приладу. На основі розгляду фізичних процесів, які протікають у газочутливих елементах і автогенераторних приладах, на основі методу перетворення енергії, розроблено параметричні залежності функцій чутливості і перетворення. Доведено, що основний внесок у зміну функцій перетворення і чутливості вносить зміна концентрації газу, що в свою чергу викликає зміну еквівалентної ємності та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних приладів вимірювання концентрації газу, що змінює вихідну частоту приладів. Чутливість приладу змінюється від 1,48 кГц/ppm до 2,05 кГц/ppm при зміні концентрації газу від 0 ppm до 2000 ppm в діапазоні частот 1185 МГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Awe, Y.A.; Larsen, B.K.; Sanchez-Triana, E. *The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021*; International Development in Focus; World Bank Group: Washington, DC, USA, 2022.
2. Zhang, H.; Srinivasan, R. A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. *Sustainability* 2020, 12, 9045.
3. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with

negative differential resistance. Volume 2. Publishshed by Sciencce Publishing.LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –308 p. –P.271-285.

4. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Health Risks of Indoor Exposure to Fine Particulate Matter and Practical Mitigation Solutions*; National Academies Press: Washington, DC, USA, 2024; pp. 1–237.

5. Chen, L.W.A.; Olawepo, J.O.; Bonanno, F.; Gebreselassie, A.; Zhang, M. Schoolchildren's Exposure to PM_{2.5}: A Student Club–Based Air Quality Monitoring Campaign Using Low-Cost Sensors. *Air Qual. Atmos. Health* 2020, 13, 543–551

6. Peixe, J.; Marques, G. Low-Cost IoT-Enabled Indoor Air Quality Monitoring Systems: A Systematic Review. *J. Ambient Intell. Smart Environ.* 2024, 16, 167–180.

7. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: В 3-ох т. / В. Вуйцік, З. Готра, О. Готра та інш.; Львів: Ліга-Прес, 2003. – 595 с

8. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич [та ін.]; за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.

9. Osadchuk A.V., Koenig E., Osadchuk I.O. Wissenschaft für den modernen menschen: technik und technologie, informatik, sicherheit. Chapter 10. Application of multifactor models for forecasting of PSA (phthalic anhydrid) emissions in airplanes. Book 1. Part 1 / [team of authors: Choporov O.N., Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P., Romanyuk O.N., Sukhyi K.M. and etc.]. – Karlsruhe: NetAkhatAV, 2020 – 196 p. –P.135-150.

10. Alexander V. Osadchuk, Volodymyr S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Nataliia V. Titova, Olga Yu. Pinaeva, Piotr Kisała, Saule Rakhmetullina, Aliya Kalizhanova, Zhanar Azeshova. Optical-frequency gas flow meter on the basis of transistor structures with negative differential resistance // Proc. SPIE 11456, Optical Fibers and Their Applications 2020, 114560F (12 June 2020); –P.74-81.

11. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Вплив ємності просторового заряду на газореактивний ефект в напівпровідникових сенсорах газу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. №4. –С.41-48.

12. Осадчук Я.О. Мікроелектронні автогенераторні сенсори концентрації газу з частотним виходом // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34(73), №2 2023. –С.266-275.

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Шукун Костянтин Віталійович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Петренко Віталій Іванович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovyich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Shykun Kostyantyn Vitaliyovych – postgraduate student of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Petrenko Vitaliy Ivanovych – Postgraduate Student of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.