

О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, Д.Р. Ільчук, Г.О. Пастушенко

Твердотільний радіовимірювальний оптико-частотний перетворювач витрат газу

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, osadchuk.av69@gmail.com

В роботі представлено дослідження твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель твердотільного радіовимірювального оптико-частотного витратоміра, яка дозволила отримати функцію перетворення та рівняння чутливості. Твердотільний радіовимірювальний оптико-частотний витратомір газу створено на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, що складається з НЕМТ польового транзистора і біполярного транзистора з пасивним індуктивним елементом. При заміні пасивної індуктивності на активний індуктивний елемент перетворювач повністю можна виконати в інтегральному вигляді. В основі роботи твердотільного радіовимірювального оптико-частотного витратоміру газу лежить інтерферометричний спосіб рефрактометрії оптично прозорих рідин і газів. Від'ємний опір, утворений паралельним включенням повного опору з емнісною складовою на електродах колектор-стік транзисторної структури та індуктивності, приводить до виникнення електричних коливань в контурі твердотільного автогенератора. Встановлено, що на виході твердотільного радіовимірювального оптико-частотного витратоміра існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною оптичного випромінювання, яке діє на фоточутливі транзистори. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що зі зростанням витрат газу від 0 л/год до 4 л/год зменшується частота генерації від 812,65 МГц до 811,62 МГц при напрузі живлення 3,3 В, а при напрузі живлення 3,8 В від 813,00 МГц до 811,80 МГц. Показано, що вибором режиму живлення з постійної напруги, можна отримати практично лінійну залежність частоти генерації від витрат газу та вибирати канали для передачі вимірювальної інформації. Проведені дослідження показали, що чутливість розробленого пристрою складає 262 кГц/л/год. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 2,5 %.

Ключові слова: твердотільний радіовимірювальний оптико-частотний витратомір газу, фоточутливий транзистор, від'ємний диференціальний опір, частота, інтерферометричний спосіб рефрактометрії.

Подано до редакції 1.03.2021; прийнято до друку 10.04.2021.

Вступ

На сучасному етапі розвитку твердотільної електроніки і науково-технічного прогресу, основними напрямками розвитку мікро- та наноелектроніки є удосконалення існуючих і створення нових методів і засобів збору, обробки, зберігання і передачі інформації з одного боку, а з іншого – створення високоточної і чутливої техніки систем автоматизації і контролю для промисловості,

транспорту, військової техніки, медицини, побутових цілей, тощо [1, 4-8]. Перший напрямок забезпечує розвиток і удосконалення мікроелектронної технології виробництва, інтенсивне зростання продуктивності праці, забезпечення дотримання норм санітарно-гігієнічних умов праці персоналу, та високої якості готової промислової продукції. Саме тому дослідження і розробки методик і вимірювальних засобів величин як електричної, так і неелектричної природи на сьогодні є актуальним

науковим напрямком [1, 2, 4–8].

Серед перетворювачів неелектричних величин важливе місце посідають перетворювачі витрат газу та рідин, які в останній час мають широкий спектр застосування. Вони необхідні для проведення наукових досліджень, для керування технологічними процесами, для контролю роботи енергетичних установок, для керування літаками і космічними кораблями. Окрім цього, прецизійні перетворювачі витрат газу необхідні в медичній техніці [9].

Тому важливим завданням сучасного мікроелектронного приладобудування та вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання витрат газу та рідини стосовно різних виробництв, створення твердотільних радіовимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [10].

Одним з нових наукових напрямків в побудові твердотільних радіовимірювальних перетворювачів витрат газу є дослідження в сфері частотних витратомірів на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором. Твердотільні радіовимірювальні перетворювачі витрат газу з частотним виходом поєднують як простоту, так і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, а також високу чутливість, точність і завадостійкість, які характерні для вимірювальних перетворювачів з кодовим вихідним сигналом [10-13].

Дослідження цього наукового напрямку показали, що реактивні властивості та від'ємний диференціальний опір нерозривно пов'язані між собою, а багатofункціональність і простота радіовимірювальних приладів на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором є перспективним напрямком при їх побудові та практичному використанні. Також, застосування принципу перетворення «витрати газу–частота» на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором суттєво знижує вартість інфокомунікаційних-вимірювальних приладів та систем, а також дозволяє зменшити масо-габаритні характеристики радіовимірювальних перетворювачів витрат газу, підвищити не тільки чутливість, але і точність перетворення інформативного сигналу в частоту [10-17].

Метою роботи є розроблення та дослідження твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати переваги застосування реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором; 2) розрахувати основні характеристики твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу, в яких враховано залежність реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним

диференціальним опором від витрат газу; 3) зробити висновки по проведеному дослідженню.

I. Методи досліджень

Для створення твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу використаємо інтерферометричний спосіб рефрактометрії оптично прозорих рідин і газів, а в якості фоточутливого пристрою обрано частотний перетворювач на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

Розглянемо принцип роботи оптичної частини витратоміра газу. Для забезпечення високої чутливості і точності вимірювання витрат газу у конструкцію введено додаткове дзеркало, яке розміщено на одній оптичній осі з напівпрозорими пластинами та джерелом випромінювання, причому обидва дзеркала розташовані за межами вимірювальної камери з газом, так що в досліджуваному середовищі відсутні об'єкти. Оптико-частотний витратомір газу містить джерело випромінювання, ємність з досліджуванним середовищем, напівпрозорі пластини і два дзеркала, які знаходяться на оптичних осях по ходу оптичних променів, а також вузол вимірювання оптичної різниці ходу променів (частотний оптичний перетворювач). Як ємність з досліджуванним середовищем використовується трубопровід з газом, виконаний із двома симетрично розташованими відносно осі трубопроводу і за напрямком потоку парами отворів, що закриті оптичними скляними пластинами, крім того додатково міститься ще одне дзеркало. Дзеркала розташовані за межами трубопроводу, причому додаткове дзеркало та напівпрозорі пластини розміщені на одній оптичній осі з джерелом випромінювання.

II. Результати та обговорення

На рис. 1 зображено схему твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу. Радіовимірювальний перетворювач витрат газу містить джерело світлового випромінювання 1, яким є світловипромінюючий AsGa діод типу CQY36N (довжина хвилі 950 нм), напівпрозору пластину 2 на оптичній осі променю, промінь світла 3, що відбивається від напівпрозорої пластини 2 та через оптичні скляні пластини 4, 5 потрапляє на дзеркало 6, а промінь світла 7 проходить через напівпрозору пластину 8 на додаткове дзеркало 9 і через оптичні скляні пластини 10, 11 потрапляє на дзеркало 12, відбиті від дзеркал 6 і 12 промені потрапляють в вузол вимірювання оптичної різниці ходу променів (оптико-частотний перетворювач на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором) 13 [18]. Додаткове дзеркало 9, а також напівпрозорі пластини 8 і 2 розміщені на одній оптичній осі з джерелом

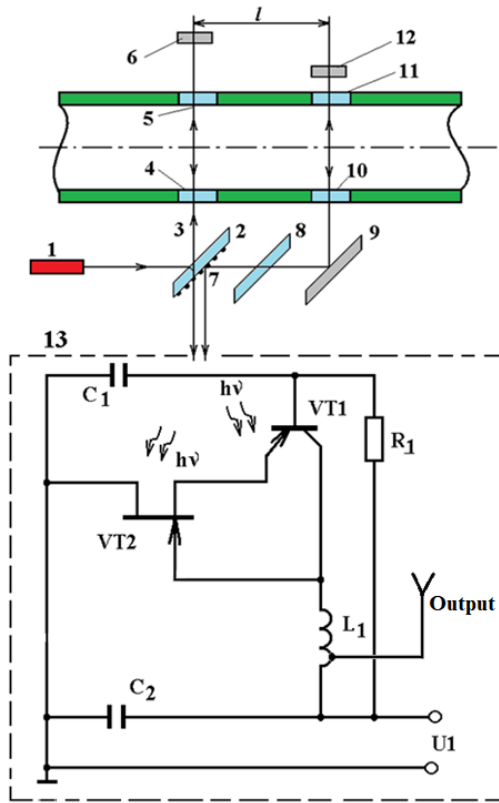


Рис. 1. Схема радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу.

світлового випромінювання 1. В оптико-частотному витратомірі газу в якості чутливих до оптичного випромінювання елементів використано фоточутливі біполярний та польовий транзистори.

Оптичні довжини шляху, який проходять перший і другий промені через об'єм газу, різні при проходженні газу по трубопроводу. Витрати газу зв'язані з різницею тисків у двох перетинах трубопроводу рівнянням [18]:

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{8\mu l} \pi R^4, \quad (1)$$

де $P_1 - P_2$ – різниця тисків у двох перетинах вимірювальної камери оптико-частотного витратоміру газу; Q – витрати газу; l – відстань між перетинами вимірювальної камери витратоміра; μ – динамічна в'язкість вимірюваного газу; R – радіус вимірювальної камери.

При використанні інтерферометра максимуми інтенсивності інтерферуючих хвиль у вимірювальній камері перетворювача спостерігаються при виконанні наступної умови [18]:

$$(n_1 - n_2)2R = \lambda_0 k, \quad (2)$$

де λ_0 – довжина хвилі оптичного випромінювання; $k = 0, 1, 2, \dots$ – коефіцієнт, який визначається вузлом вимірювання оптичної різниці ходу променів у вимірювальній камері оптико-частотного перетворювача.

Залежність витрат газу від потужності оптичного

випромінювання описується виразом:

$$Q = z \cdot P \cdot k, \quad (3)$$

де z – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт пропорційності визначається методом торирування витрат до числа, що описує відношення оптичної різниці ходу променів до довжини хвилі світла, тобто показанню вузла вимірювання оптичної різниці ходу променів.

Твердотільний радіовимірювальний оптико-частотний перетворювач витрат газу реалізований на основі конструкції, яка складається з НЕМТ польового транзистора (ATF35143) і біполярного транзистора (BFT93). В цій конструкції фоточутливим елементом виступають як польовий, так і біполярний транзистор (рис. 1). Теоретично і експериментально показано, що на електродах колектор-стік запропонованої транзисторної структури існує від'ємний диференційний опір, що відповідає спадаючій ділянці на вольт-амперній характеристиці [9, 11, 12]. Радіовимірювальний оптико-частотний перетворювач витрат газу живиться від джерела постійної напруги U_1 . Електричне коло $R_1 C_1$ створює додатковий зворотний позитивний зв'язок виходу із входом, а також через опір R_1 здійснюється керування з постійного струму біполярного транзистора VT1, а ємність C_1 визначає ємнісну складову повного опору транзисторної структури. Ємність C_2 здійснює блокувальну роль, тобто захищає джерело постійного струму U_1 від струмів надзвичайно високих частот. Коливальний контур утворений пасивною індуктивністю L_1 і ємністю складовою повного опору транзисторної структури, яка існує на електродах колектор-стік біполярного та транзисторів. При заміні пасивної індуктивності на активний індуктивний елемент перетворювач повністю можна виконати в інтегральному вигляді.

Для вивчення поведінки твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної і реактивної складових повного опору на електродах колектор-стік транзисторної структури, частоти генерації, функції перетворення і чутливості від дії оптичного випромінювання і в кінцевому результаті від витрат газу. Розрахунки зроблені на основі еквівалентної схеми біполярного та польового НЕМТ транзисторів (рис. 2).

Вольт-амперна характеристика радіовимірювального перетворювача на основі НЕМТ польового транзистора і біполярного транзистора має ділянку від'ємного опору, що дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі, який утворений еквівалентною ємністю колектор-стік структури і зовнішньою індуктивністю. Функція перетворення розраховується із системи рівнянь, які складаються на основі еквівалентної схеми перетворювача (рис. 3). Система рівнянь Кірхгофа, згідно напрямкам контурних струмів, має вигляд:

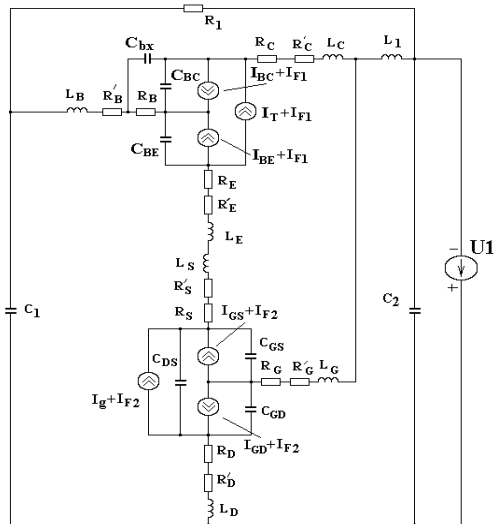


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача на основі НЕМТ польового транзистора і біполярного транзистора.

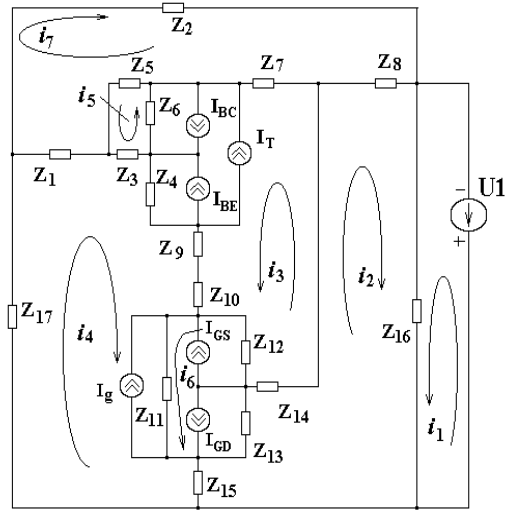


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема перетворювача на основі НЕМТ польового транзистора і біполярного транзистора.

$$\left. \begin{aligned}
 U_1 &= Z_{16}(i_1 + i_2), \\
 0 &= (Z_8 + Z_{16} + Z_{15} + Z_{13} + Z_{14})i_2 - Z_8i_7 + Z_{16}i_1 - Z_{15}i_4 + Z_{13}i_6 + Z_{14}i_3 + Z_{13}(I_{gd} - I_{gs} - I_g), \\
 0 &= (Z_7 + Z_6 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{14})i_3 + Z_7i_7 - Z_6i_5 + Z_6(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + Z_4i_4 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\
 &+ (Z_9 + Z_{10})i_4 - Z_{12}i_6 + Z_{12}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + Z_{14}i_2, \\
 0 &= (Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{15} + Z_{17})i_4 - Z_1i_7 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + (Z_9 + Z_{10})i_3 + Z_{11}i_6 + \\
 &+ Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) - Z_{15}i_2 + Z_3i_5 + Z_3i_3, \\
 0 &= (Z_5 + Z_3 + Z_6)i_5 + Z_5i_7 + Z_3i_4 - Z_6i_3 + Z_6(I_{bc} - I_{be} - I_T), \\
 0 &= (Z_{11} + Z_{13} + Z_{12})i_6 + Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_T) + Z_{11}i_4 + Z_{13}i_2 + Z_{13}(I_{gd} - I_{gs} - I_g) - Z_{12}i_3 + Z_{12}(I_{gd} - I_{gs} - I_g), \\
 0 &= (Z_8 + Z_7 + Z_5 + Z_1 + Z_2)i_7 - Z_8i_2 + Z_7i_3 + Z_5i_5 - Z_1i_4
 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де $Z_2 = R_1$, $Z_1 = R'_B + j\omega L_B$, $Z_3 = R_B$, $Z_4 = -j/(\omega C_{BE})$, $Z_5 = -j/(\omega C_{bx})$, $Z_6 = -j/(\omega C_{BC})$, $Z_7 = R_C + R'_C + j\omega L_C$, $Z_8 = j\omega L_1$, $Z_9 = R_E + R'_E + j\omega L_E$, $Z_{10} = R_S + R'_S + j\omega L_S$, $Z_{11} = -j/(\omega C_{DS})$, $Z_{12} = -j/(\omega C_{GS})$, $Z_{13} = -j/(\omega C_{GD})$, $Z_{14} = R_G + R'_G + j\omega L_G$, $Z_{15} = R_D + R'_D + j\omega L_D$, $Z_{16} = -j/(\omega C_2)$, $Z_{17} = -j/(\omega C_1)$.

Розв'язання системи рівнянь проводилось методом Гауса на персональному комп'ютері за допомогою пакету програм "Matlab 9.4" [19]. Параметри транзисторів, які складають фоточутливу структуру, а також параметри еквівалентної схеми перетворювача визначались з робіт [20-23]. Розрахунки повного опору структури дозволяють отримати всі необхідні метрологічні характеристики радіовимірвального оптико-частотного перетворювача витрат газу.

На рис. 4 представлено теоретичні і експериментальні залежності активної складової від потужності випромінювання з різними напругами живлення. Аналіз показує, що спостерігається незначне зростання від'ємного диференційного опору із зростанням потужності оптичного випромінювання від 0 мкВт/см² до 80 мкВт/см² з напругами живлення 3,3 В. Зі зменшенням напруги живлення до 2,2 В спостерігається більше зростання

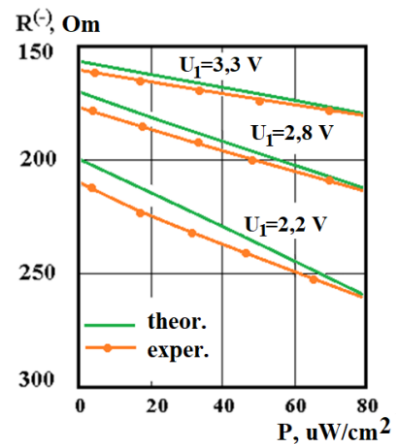


Рис. 4. Теоретичні і експериментальні залежності активної складової від потужності випромінювання з різними напругами живлення.

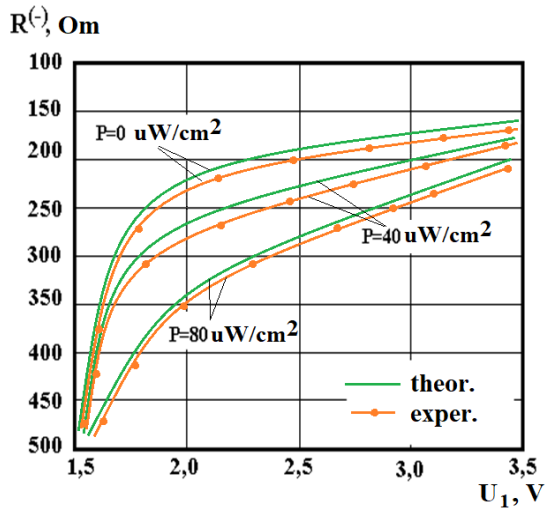


Рис. 5. Залежність активної складової від напруги живлення з різними потужностями випромінювання.

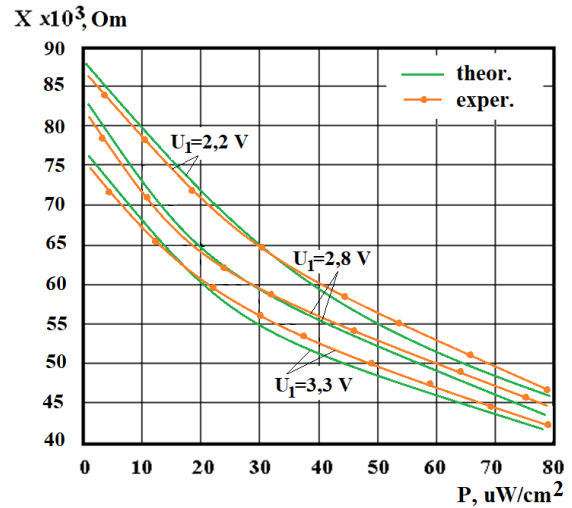


Рис. 6. Теоретична і експериментальна залежність реактивної складової від потужності оптичного випромінювання.

від'ємного диференційного опору до 65 Ом із зміною потужності випромінювання від 0 мкВт/см² до 80 мкВт/см². На рис. 5 представлено залежність від'ємного диференційного опору від напруги живлення при різних значеннях потужності випромінювання. Зростання напруги живлення більше 3,5 В приводить до меншої залежності активного опору від потужності світлового потоку.

Теоретичні та експериментальні залежності реактивної складової повного опору твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу від потужності випромінювання представлені на рис. 6. Реактивна

складова має ємнісний характер і її значення по модулю майже лінійно зменшується із зростанням потужності світлового випромінювання.

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від витрат газу. Це можливо зробити розв'язавши систему рівнянь (4), яка складена для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 3). При розділі повного опору на дійсну і уявну складові, неважко визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від потужності падаючого випромінювання і відповідно до витрат газу. Функція перетворення в цьому випадку має вигляд:

$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_{ds}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_{ds}(Q)}{LC_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2}}{\pi}} \quad (5)$$

На рис. 7 представлена залежність частоти генерації від витрат газу. Найкращу залежність для функції перетворення можна одержати, якщо довжина хвилі оптичного випромінювання дорівнює 0,95 мкм. Експериментальні дослідження показали, що частота генерації збільшується від 810,15 МГц до 813,75 МГц, якщо напруга збільшується від 1,4 В до 3,8 В. Рівняння чутливості визначається на основі виразу (5) і описується формулою:

$$S_Q = \frac{1}{4} \left(\left(\frac{\partial C_{be}(Q)}{\partial Q} \right) C_{ds}(Q)C_2 + C_{be}(Q) \left(\frac{\partial C_{ds}(Q)}{\partial Q} \right) C_2 + \left(\frac{\partial C_{bc}(Q)}{\partial Q} \right) C_{ds}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_2 \left(\frac{\partial C_{ds}(Q)}{\partial Q} \right) + \left(\frac{\partial C_{bc}(Q)}{\partial Q} \right) C_{be}(Q)C_2 + \left(\frac{\partial C_{be}(Q)}{\partial Q} \right) C_{bc}(Q)C_2 + \left(\frac{\partial C_{bc}(Q)}{\partial Q} \right) C_{be}(Q)C_{ds}(Q) + \left(\frac{\partial C_{be}(Q)}{\partial Q} \right) C_{bc}(Q)C_{ds}(Q) + \left(\frac{\partial C_{ds}(Q)}{\partial Q} \right) C_{bc}(Q)C_{be}(Q) \right) / (LC_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2) - \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{bc}(Q)}{\partial Q} \right)}{LC_{bc}^2(Q)C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2} - \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{be}(Q)}{\partial Q} \right)}{LC_{bc}(Q)C_{be}^2(Q)C_{ds}(Q)C_2} - \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{ds}(Q)}{\partial Q} \right)}{LC_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_{ds}^2(Q)C_2} \right) / \left(\pi \sqrt{LC_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2} \right), \quad (6)$$

$$\text{де } A_1 = C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_{ds}(Q)C_2 + C_{bc}(Q)C_{be}(Q)C_2 + C_{be}(Q)C_{ds}(Q)C_{bc}(Q).$$

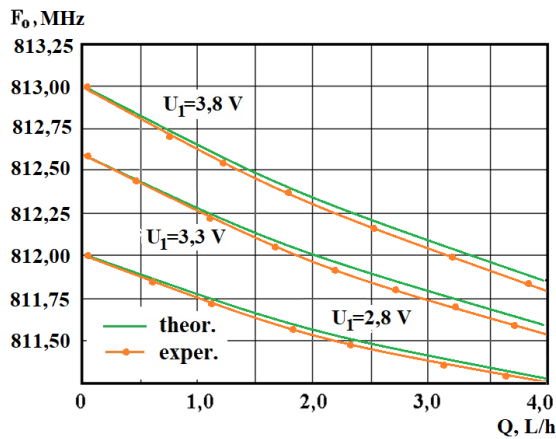


Рис. 7. Залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання.

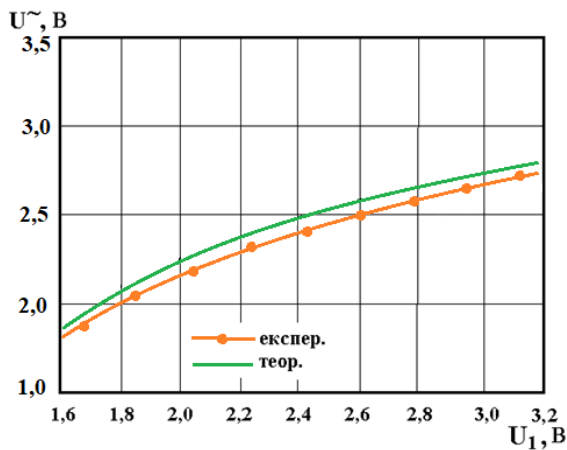


Рис. 8. Залежність вихідної змінної напруги від напруги живлення.

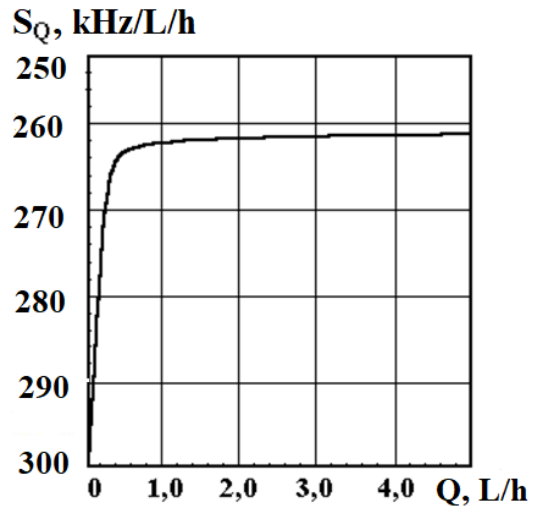


Рис. 9. Залежність чутливості радіовимірювального оптико-частотного витратоміра від витрат газу.

На рис. 8 наведені теоретична і експериментальна залежність вихідної напруги від напруги живлення. Вихідна напруга зростає від 1,75 В майже до 2,78 В із зростанням напруги живлення від 1,6 В до 3,3 В. Чутливість пристрою складає від 296 кГц/л/год до 262 кГц/л/год (рис. 9). Температурно-стабільна ділянка роботи твердотільного радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу лежить в діапазоні температур від -40 °С до +80 °С.

Частота 812 - 814 МГц вибрана згідно стандарту EN 300 466, або Європейського стандарту ECC DEC (01)02. Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального оптико-

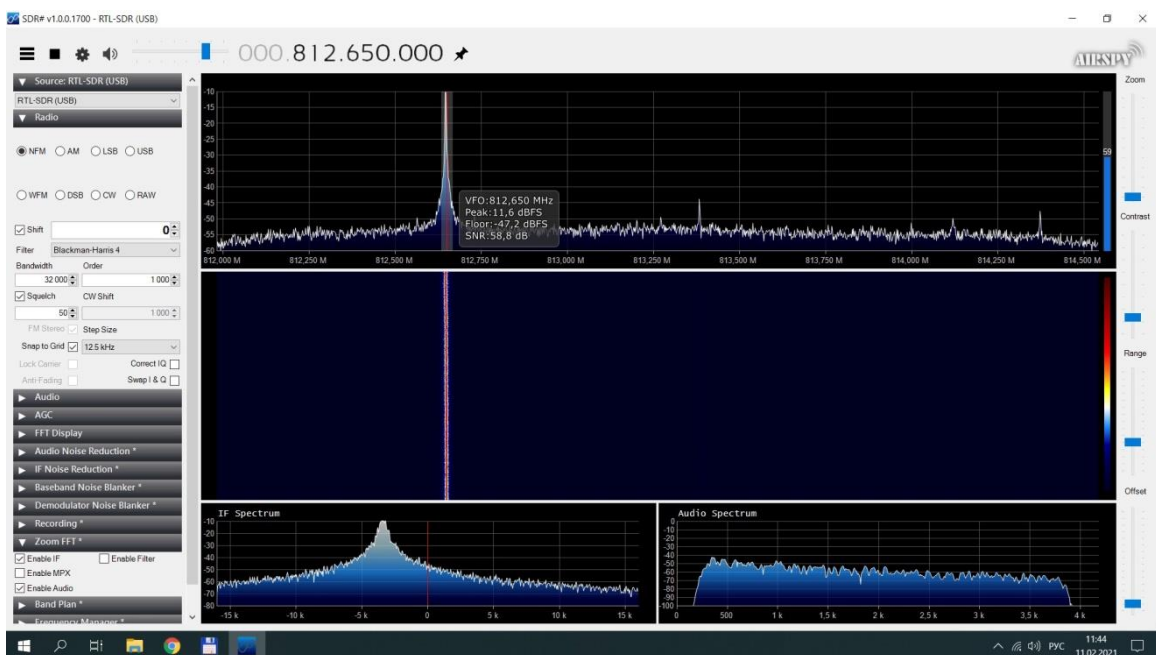


Рис. 10. Спектр передачі радіовимірювального оптико-частотного витратоміра без зміни витрат газу.

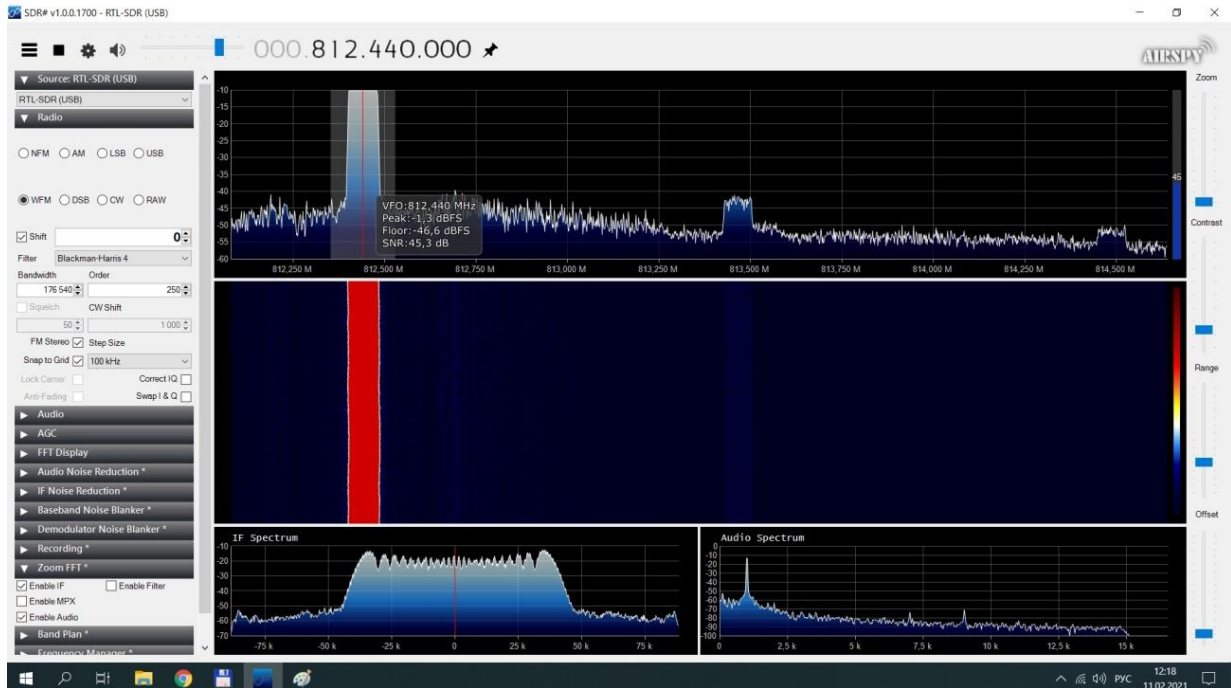


Рис. 11. Спектр передачі радіовимірювального оптико-частотного витратоміра при зміні витрат газу.

частотного витратоміра показали, що зі зростанням витрат газу від 0 л/год до 4 л/год зменшується частота генерації від 812,65 МГц до 811,62 МГц при напрузі живлення 3,3 В, а при напрузі живлення 3,8 В від 813,00 МГц до 811,80 МГц. Дослідження показали, що вибором режиму живлення з постійної напруги, можна отримати лінійну залежність частоти генерації від витрат газу та вибирати канали для передачі вимірювальної інформації. Оптимальною напругою живлення є величина 3,3 В, при якій існує найменша зміна частоти генерації в діапазоні від 20 °С до 80 °С. Проведені експериментальні та теоретичні дослідження показали, що чутливість розробленого пристрою складає 262,5 кГц/л/год (рис. 9).

На рис. 10 та рис. 11 представлені скріншоти з програми SDRSharp з приймачем на основі RTL2832U + R820T [24, 25]. Частота дискретизації (ширина смуги приймача) вибрана на рівні 2,5 МГц. Чим більше значення, тим ширше ми будемо бачити смугу на аналізаторі спектра. Вибір ширини смуги пропускання ґрунтується, як правило, на продуктивності комп'ютера. Чим ширша смуга пропускання, тим більше ресурсів необхідно задіяти для програми. Наприклад, ширина пропускання на комп'ютері з процесором Core i5 і оперативною пам'яттю в 16 гігабайт складає 2,5 MSPS. Як видно з рис. 10, ширина спектру передачі оптико-частотного витратоміра без зміни витрат газу складає 2 кГц на частоті 812,650 МГц при напрузі живлення 3,3 В. На рис. 11 представлено спектр радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу при витратах газу від 0,8 л/год ширина спектру передачі збільшується до 70 кГц. Даний частотний метод модуляції дозволяє збільшити завадостійкість в 2,5 рази та збільшити дальність передачі при мінімальній

потужності передачі.

Висновки

Розроблено математичну модель твердотілого радіовимірювального оптико-частотного перетворювача витрат газу, що дозволило отримати аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості приладу. Запропоновано конструкцію витратоміру газу на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка складається з НЕМТ польового транзистора і біполярного транзистора з пасивним індуктивним елементом. В основі роботи твердотілого радіовимірювального оптико-частотного витратоміру газу лежить інтерферометричний спосіб рефрактометрії оптично прозорих рідин і газів. Використовуючи середовище Matlab, розраховано основні параметри сенсора газу та доведено адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході радіовимірювального оптико-частотного витратоміра існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною витрат газу. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження показали, що зі зростанням витрат газу від 0 л/год до 4 л/год зменшується частота генерації від 812,65 МГц до 811,62 МГц при напрузі живлення 3,3 В, а при напрузі живлення 3,8 В від 813,00 МГц до 811,80 МГц. Показано, що вибором режиму живлення з постійної напруги можна отримати лінійну залежність частоти генерації від витрат газу та вибирати канали для передачі вимірювальної інформації. Проведені дослідження показали, що чутливість розробленого пристрою складає

262 кГц/л/год. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 2,5 %.

Осадчук О.В. – професор, д.т.н., завідувач кафедри радіотехніки;
Осадчук В.С. – професор, д.т.н., професор кафедри радіотехніки;
Осадчук Я.О. – к.т.н., доцент кафедри радіотехніки;
Льчук Д.Р. – аспірант кафедри радіотехніки;
Пастушенко Г.О. – магістр кафедри метрології та промислової автоматики.

- [1] H. Schaumburg, Sensoren (Stuttgart, Teubner, 1992).
- [2] R.G. Jackson, Latest sensors (Technosphere, Moscow, 2007).
- [3] Sensors: Reference Manual/Under total. ed. V.M. Sharapova, E.S. Polishchuk, (Technosphere, Moscow, 2012).
- [4] V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, Y.A. Yushchenko, Elektronika ir Elektrotehnika 84(4), 89 (2008).
- [5] Microelectronic sensors of physical quantities / Ed. Z. Yu. Gotra, Vol. 2 (League - Press, Lviv, 2002).
- [6] R.A. Hooshmand, M. Joorabian, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol. 153(4), (2006).
- [7] Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh, International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication 3(8), 5224 (2015).
- [8] Rainer Engell, Hans-Joachim Baade, Determination of liquid flowmeter characteristics for precision measurement purposes by utilizing special capabilities of pfb's "hydrodynamic test field". Conference: 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement (Querétaro, Mexico, 2006). (DOI: 10.13140/2.1.1424.0321).
- [9] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, Radiomeasuring microelectronic transducers of physical quantities. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) (2015) (DOI: 10.1109/sibcon.2015.7147167).
- [10] N.G. Tarnovskii, V.S. Osadchuk, A.V. Osadchuk, Russian Microelectronics 29(4), 279 (2000) (DOI:10.1007/BF02773276).
- [11] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletskaya, P. Kisała, K. Nurseitova, Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 111761I (2019).
- [12] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov, Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 104451X (2017).
- [13] A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, P. Kisała, T. Zyska, A. Annabaev, K. Mussabekov, Przegląd Elektrotechniczny R93(3), 113 (2017).
- [14] Yulin Jiang, Sensors 20, 1431 (2020) (DOI:10.3390/s20051431).
- [15] Jianfeng Chen, Kai Zhang, Leiyang Wang and Mingyue Yang, Sensors 20, 4804 (2020) (DOI:10.3390/s20174804).
- [16] Mateusz Turkowski, Artur Szczecki and Maciej Szudarek, Sensors 19, 530 (2019) (DOI:10.3390/s19030530).
- [17] Thi Huong Ly Nguyen and Suhyun Park, Sensors 20, 388 (2020) (DOI:10.3390/s20020388).
- [18] Patent № 34077 of Ukraine, G01 No. 21/45. Optical floumometer of gas with frequency output / Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Deundyak V.P., Deundyak M.V. // Publ. Bul. No. 14 dated July 25, 2008.
- [19] MATLAB Programming Fundamental (MathWorks, Inc, 2019).
- [20] S.M. Sze, K.Ng. Kwok, Physics of Semiconductor Devices (Wiley-Interscience, Hoboken, USA, 2007).
- [21] User`s Guide includes PSPICE A/D, PSPICE A/D Basics and PSPICE Cadence Design Systems. Inc. All rights reserved (2016).
- [22] L. Rosado, Physical electronics and microelectronics. Ed. V.A. Terekhova (Higher school, Moskow, 1991).
- [23] V.V. Brajlowskyj, A.D. Veryga, Z.J. Gotra et al, Radioelectron. Commun. Syst. 53, 550 (2010) (DOI:10.3103/S0735272710100055).
- [24] <https://airspsy.com/download/>.
- [25] <https://www.rtl-sdr.com/tag/sdrsharp/>.

Solid State Radio-Measuring Optical-Frequency Transducer of Gas Flow Rate

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine, osadchuk.av69@gmail.com

The paper presents a study of a solid state radio-measuring optical-frequency transducer of gas consumption based on a transistor structure with a negative differential resistance. A mathematical model of a solid state radio-measuring optical-frequency flowmeter was developed, which made it possible to obtain the conversion function and the sensitivity equation. The solid state radio-measuring optical-frequency gas flowmeter is based on a transistor structure with a negative differential resistance, consisting of a HEMT field-effect transistor and a bipolar transistor with a passive inductive element. When replacing the passive inductance with an active inductive element, the transducer can be completely integrated. The operation of a solid state radio-measuring optical-frequency gas flowmeter is based on the interferometric method of refractometry of optically transparent liquids and gases. The negative differential resistance formed by the parallel connection of the impedance with the capacitive component on the collector-drain electrodes of the transistor structure and inductance leads to the occurrence of electrical oscillations in the oscillator circuit. Theoretical and experimental studies have shown that with an increase in gas consumption from 0 l/h to 4 l/h, the generation frequency decreases from 812.65 MHz to 811.62 MHz at a supply voltage of 3.3 V, and at a supply voltage of 3.8 V from 813.00 MHz to 811.80 MHz. It is shown that by choosing a constant voltage power supply mode, it is possible to obtain an almost linear dependence of the generation frequency on the gas flow rate and choose channels for transmitting measurement information. Studies have shown that the sensitivity of the developed device is 262 kHz/l/h. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 2.5 %.

Keywords: solid state radio-measuring optical-frequency gas flowmeter, photosensitive transistor, negative differential resistance, frequency, interferometric refractometry.