

**ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЮЩЕНКО ЮРІЙ АНДРІЙОВИЧ**

УДК 621.382.8

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ВИТРАТ ГАЗУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Спеціальність 05.11.08 – Радіовимірювальні прилади

**Автореферат**

**дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Вінниця - 2009**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Осадчук Володимир Степанович,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Поджаренко Володимир Олександрович,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри метрології та промислової автоматики

доктор технічних наук, професор  
Яненко Олексій Пилипович,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут", професор  
кафедри радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Захист відбудеться " 17 " квітня 2009 р. о 14<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГУК, ауд.210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розіслано " 10 " березня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.В. Павлов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На даному етапі розвитку науково-технічного прогресу, аналітичне приладобудування є однією з нових областей використання мікроелектроніки, яка за допомогою групових методів технології дозволяє розробляти та створювати сенсори для контролю технологічних процесів, параметрів навколишнього середовища. Створення вимірювальних перетворювачів є одною з актуальних проблем сьогодення. Вдосконалення систем автоматичного контролю і управління різними об'єктами, процесами, виробництвами визначається досягненнями в цій галузі.

Загальна тенденція в розвитку вимірювальних перетворювачів, в тому числі і перетворювачів витрат, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному ускладненні експлуатаційних умов. Все це змушує проводити пошуки і розробку нових фізичних явищ, нових матеріалів, нових методів вимірювання, які б дозволили вирішити задачі, що з'являються у зв'язку з потребами практики.

Одну із провідних позицій в науковому світі по розробці первинних перетворювачів займає Україна. Це насамперед стало можливим завдяки роботі відомих українських вчених Вікуліна І.М., Готри З.Ю., Кошового М.Д., Костенка В. Л., Кухарчука В.В., Манойлова В. П., Луцика Я. Т., Осадчука В.С., Осадчука О. В., Пістуна Е. П., Поджаренка В.О., Романова В. О., Стадника Б. І., Скрипника Ю. О., Шарапова В. М., Філінюка М. А., Яненка О. П., а також закордонних вчених Арутюняна В. М., Аша Ж., Бутурліна А. І., Віглеба Г., Кремлівського П. П., Новицького П. В., Стафеева В. І., Турчина А. М., Ейдукаса Д. Ю. та інших.

Перспективним науковим напрямком є розробка та створення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення "витрати газу-частота" на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкцій аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити "інтелектуальні" вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем оброблення інформації та первинного перетворювача.

Тому, необхідність розробки теоретичних підходів до створення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових приладів з від'ємним опором, а також розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінювання їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання витрат газу в промисловості з використанням радіовимірювальних перетворювачів витрат газу та впровадження їх у виробництво є актуальним на даний час.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота проводилася відповідно до госпдоговірних та держбюджетних фундаментальних науково-дослідних робіт: "Розробка математичних моделей і принципів схем радіовимірювальних перетворювачів витрат газу" (НДР № ДР 0108U00935, 2008 р.), "Розробка математичних моделей мікроелектронних радіовимірювальних перетворювачів для систем променевої парофазної технології" (№ ДР 0105U002419, 2005-2007 рр.), а також відповідно до Програми розвитку електронної промисловості України на 2005-2010 рр. "Електроніка України-2010".

### **Мета і завдання дослідження**

**Метою роботи** є покращення метрологічних показників радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, технологічно сумісних з мікроелектронною елементною базою, принцип роботи яких базується на використанні функціональної залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором від зміни витрат газу, що надає можливість створення та виготовлення конкурентноспроможних зразків цієї продукції.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення витрат газу у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах.

**Предметом дослідження** – статичні і динамічні характеристики радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв’язуються такі завдання:

- проаналізувати існуючі перетворювачі витрат газу та обґрунтувати переваги перетворювачів витрат газу з частотним виходом по відношенню до існуючих;
- розробити математичну модель теплових процесів в інтегральній схемі радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу;
- розробити математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, на основі яких отримати аналітичні залежності вольт-амперних характеристик перетворювачів, залежність повного вихідного опору від витрат газу, функції перетворення та рівняння чутливості;
- розробити радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу на основі двох біполярних і МДН- та біполярного транзисторних структур з пасивним та активним індуктивними елементами;
- виконати експериментальну перевірку математичних моделей і дослідити властивості радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів від витрат газу;
- розробити мікропроцесорну систему вимірювання витрат газу з використанням радіовимірювальних перетворювачів витрат газу на основі транзисторних структур з від’ємним опором;
- здійснити метрологічну оцінку похибок вимірювання витрат газу і впровадити розроблені перетворювачі у практику.

**Методи дослідження** ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей перетворювачів; основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі теплових процесів в інтегральній схемі радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення повного опору радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу на основі двох біполярних і МДН- та біполярного транзисторних структур; теорії ймовірності для оцінки похибок вимірювання.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

**Наукова новизна** роботи полягає в отриманні таких результатів:

1. Вперше запропоновано використання реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором для створення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, що працюють за принципом “витрати газу-частота”.
2. Вперше розроблено математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив витрат газу через залежність параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі двох біполярних і МДН- та біполярного транзисторних структур з від’ємним опором, що дало змогу отримати рівняння чутливості та функції перетворення витрат газу у частоту.
3. Удосконалено математичну модель теплових процесів в інтегральній схемі перетворювача, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані фізичні процеси, що приводять до зміни температури активних та пасивних елементів радіовимірювального мікроелектронного перетворювача на основі транзисторних структур.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. У результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використаними для інженерного розрахунку вольт-амперних характеристик радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, що забезпечують вибір оптимального режиму їх електричного живлення.
2. Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, які можуть бути використані для інженерного розрахунку характеристик перетворювачів витрат газу.

3. Розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу на основі двох біполярних і МДН- та біполярного транзисторних структур для виміру витрат газу в діапазоні від 0 до 80 л/год з чутливістю від 230 Гц/л/год до 750 Гц/л/год для перетворювача на основі двох біполярних транзисторів та з чутливістю від 20 до 54 кГц/л/год для перетворювача на основі МДН- та біполярного транзисторів при похибці вимірювання  $\pm 1,7\%$  і амплітудою вихідного сигналу 5В.
4. Розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу на основі двох біполярних і МДН- та біполярного транзисторних структур з активним індуктивним елементом для виміру витрат газу в діапазоні від 0 до 80 л/год з чутливістю від 1000 до 1750 Гц/л/год для перетворювача на основі двох біполярних транзисторів та з чутливістю від 32 до 56 кГц/л/год для перетворювача на основі МДН- та біполярного транзисторів при похибці вимірювання  $\pm 1,7\%$  і амплітудою вихідного сигналу 5 В.
5. Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі "Matlab 6.5" для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу.

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи впроваджено ДК "Укртрансгаз" (м. Київ), а також у навчальний процес при вивченні спецкурсу "Напівпровідникові перетворювачі інформації" для студентів спеціальності 07.09.0801 "Мікроелектроніка та напівпровідникові прилади".

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, які складають основний зміст дисертації отримані здобувачем самостійно. У роботах опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в такому: розроблено математичну модель радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі польового і біполярного транзисторів [1], отримано аналітичні залежності функцій перетворення і чутливості [2], розроблено модель перетворювача витрат газу на основі біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом [3], отримано функцію перетворення і рівняння чутливості перетворювача витрат газу [4], розроблено схему радіовимірювального перетворювача витрат газу і отримана функція перетворення [5], удосконалено теплову модель перетворювача витрат газу на основі біполярних транзисторів [6], розроблено електричну схему перетворювача витрат газу [7], проведено огляд теплових методів вимірювання витрат [8], складено рівняння Кірхгофа і розраховано вольт-амперну характеристику [9], розроблено структурну та електричну схеми блоку витрат газу [10], розраховано функцію перетворення перетворювача [11], запропоновано включення резистора у коло затвора термочутливого польового транзистора [12], запропоновано включення джерела постійної напруги до термочутливого напівпровідникового резистора і стоку другого польового транзистора [13], запропоновано підключення ємності до кола резистора і другого полюса першого джерела постійної напруги [14], включення блокувальної ємності паралельно другому джерелу постійної напруги [15].

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що викладені в дисертації, були апробовані на наукових конференціях, серед них: V Міжнародна науково-технічна конференція "Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів" 19-21 травня 2007 р. (м. Хмельницький), 2007; III Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування" (СПРТП-2007). 31 травня – 2 червня 2007р. (м. Вінниця), 2007; Міжнародна науково-технічна конференція "Датчики, прилади і системи – 2007". 16-22 вересня 2007р. (м.Ялта), 2007; II Міжнародна науково-практична конференція "Перспективні напрямки науки і техніки-2007". 16-30 листопада 2007р. (м. Пшемишль, Польща), 2007; IV Міжнародна науково-практична конференція "Наука і технології - крок у майбутнє-2008". 1-15 березня 2008р. (м. Прага, Чехія), 2008; Міжнародна науково-практична конференція "Перспективні інновації у науці, освіті, виробництві і транспорті-2008". 20-30 червня 2008 р. (м. Одеса), 2008; Міжнародна науково-технічна конференція "Датчики, прилади системи-2008", 22-24 вересня 2008 р. (м.Гурзуф), 2008; XXXV науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м.Вінниці та області. 21-24 березня 2006 р. (м. Вінниця), 2006; XXXVI науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженер-

но-технічних працівників підприємств м.Вінниці та області. 20-23 березня 2007 р. (м. Вінниця), 2007; XXXVII науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області. 24-26 березня 2008 р. (м. Вінниця), 2008.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 5 статтях науково-фахових журналах, 6 статтях в науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 4 патенти на винаходи України.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу і 5 розділів, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг дисертації 187 сторінок, з яких основний зміст викладений на 158 сторінках друкованого тексту, містить 74 рисунків, 3 таблиці. Список використаних джерел складається з 137 найменувань. Додатки містять результати розрахунків, фрагменти програмного забезпечення та акти впровадження результатів роботи.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі до дисертації обґрунтовано актуальність задач досліджень, сформульовано мету роботи та задачі дослідження. Дана характеристика наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів. Показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану існуючих перетворювачів витрат газу, які займають провідне місце серед первинних перетворювачів різного типу, до яких на сучасному етапі розвитку науки і техніки висувають підвищені вимоги точності при одночасному ускладненні експлуатаційних умов, що пов'язано з автоматизацією технологічних процесів.

Показано, що в останні роки спостерігається інтенсивний розвиток сенсорів витрат газу на основі мікроелектронної і мікропроцесорної техніки. Одним із нових напрямків у розробці радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу є створення перетворювачів витрат газу з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання частотного принципу роботи перетворювачів витрат газу дає змогу підвищити завадостійкість пристроїв, що підвищує точність, отримати значно більші вихідні сигнали в порівнянні з амплітудними перетворювачами, покращити метрологічні та економічні показники пристроїв. Виходячи з аналізу літературних джерел, визначено мету та задачі дослідження.

У другому розділі удосконалено математична модель теплових режимів радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано дію внутрішніх джерел тепловиділення, що дало змогу розрахувати стаціонарне теплове поле в об'ємі і на поверхні досліджуваних перетворювачів. На основі енергетичного балансу у витраточутливих елементах отримано аналітичний вираз для функції перетворення, в якій враховано параметри витраточутливих напівпровідникових елементів і параметри коливального контуру перетворювача.

Розподіл температури у просторі і часі в мікроелектронній схемі перетворювача витрат газу описується за допомогою рівняння теплопровідності, яке має вигляд

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = F_0(x, y, z) + \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \quad (1)$$

де  $T$  – температура;  $F_0(x, y, z)$  – густина потужності тепловиділення;  $c$  – питома теплоємність матеріалу;  $\rho$  – густина матеріалу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;  $x, y, z$  – координати транзисторів і опорів;  $t$  – час.

Стаціонарне теплове поле в об'ємі і на поверхні досліджуваної теплової моделі, виходячи із виразу (1), описується рівнянням

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} = -\frac{1}{\lambda} F_0(x, y, z), \quad (2)$$

де  $T(x, y, z)$  – температура перегріву вузла теплової моделі з координатами  $x, y, z$  відносно температури корпусу перетворювача.

Граничні умови для теплової моделі мають вигляд

$$\left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial x} \right|_{x=0, l_x} = \left. \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial y} \right|_{y=0, l_y} = 0, \quad \left[ \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} - hT(x, y, z) \right]_{z=0} = 0, \\ \left[ \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial z} - hT(x, y, z) \right]_{z=l_z} = 0, \quad (3)$$

де  $h = \alpha/\lambda$  – відносний коефіцієнт теплообміну.

Функція  $F_0(x, y, z)$  у рівнянні (1) визначає густину потужності тепловиділення, яка залежить від геометричних розмірів, розташування і потужності джерел тепла

$$F_0(x, y, z) = \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{V_i} q_i(x)q_i(y)q_i(z),$$

де  $V_i = \alpha_i \beta_i \delta_i$  – об'єм джерела тепла з номером  $i$ ;  $f_i$  – потужність джерела тепловиділення з номером  $i$ ;  $q_i(x), q_i(y), q_i(z)$  – координатні функції, які приймають значення 1 в області  $i$ -го джерела і значення 0 поза ним.

Рівняння (2)-(3) розв'язуються за допомогою метода інтегральних перетворень Фур'є з кінцевими межами із застосуванням припущення суперпозиції температурних полів. Отже, формула розрахунку температури у будь-якій точці об'єму радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу приймає вигляд

$$T(x, y, z) = T_c + \frac{2}{\lambda \gamma_0^3 l_x l_y v_0} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\delta_i} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) + \frac{4}{\lambda \gamma_0 \pi l_y v_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \left[ (n\pi/l_x)^2 + \gamma_0^2 \right]} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\alpha_i \delta_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} \cos \frac{n\pi x}{l_x} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z + h \sin \gamma_0 z) + \frac{4}{\lambda \gamma_0 \pi l_x v_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m \left[ (m\pi/l_y)^2 + \gamma_0^2 \right]} \times \\ \times \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\beta_i \delta_i} \cos \frac{m\pi y}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z_i + h \sin \gamma_0 z_i) \sin \gamma_0 \frac{\delta_i}{2} \cos \frac{m\pi y}{l_y} (\gamma_0 \cos \gamma_0 z + h \sin \gamma_0 z) + \frac{2}{\lambda l_x l_y} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_k^2 v_k^2} \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{\delta_i} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2} (\gamma_k \cos \gamma_k z + h \sin \gamma_k z) + \frac{64}{\lambda \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi x}{l_x} \cos \frac{m\pi y}{l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z + h \sin \gamma_k z)}{nm \gamma_k \left[ (n\pi/l_x)^2 + (m\pi/l_y)^2 + \gamma_k^2 \right]} \times \\ \times \sum_{i=1}^I \frac{f_i}{v_i} \cos \frac{n\pi x_i}{l_x} \sin \frac{n\pi \alpha_i}{2l_x} \cos \frac{m\pi y_i}{l_y} \sin \frac{m\pi \beta_i}{2l_y} (\gamma_k \cos \gamma_k z_i + h \sin \gamma_k z_i) \sin \gamma_k \frac{\delta_i}{2}, \quad (4)$$

де  $T_c$  – температура навколишнього середовища,

$$\gamma_0 = 2l_z h + (h^2 + \gamma_0^2) l_z^2, \quad \gamma_k = 2l_z h + (h^2 + \gamma_k^2) l_z^2. \quad (5)$$

Ряд (4) є тригонометричним рядом, який швидко сходиться, тому при його розрахунках кількість членів ряду обмежується числами  $N = 2^r$ ,  $M = 2^d$ ,  $K = 2^e$ , де  $r, d, e$  – цілі числа, які обираються виходячи з вимог точності розрахунків. Такий вибір  $N, M, K$  дозволяє використовувати швидкі перетворення Фур'є при розрахунках температури. Геометричні розміри контрольованої інтегральної схеми перетворювача, значення коефіцієнтів теплопровідності матеріалу і коефіцієнтів тепловіддачі з його поверхні визначаються з конструкції приладу.

Згідно рівняння (4) було розраховано температурне поле радіовимірювального перетворювача витрат газу на поверхні. Максимальна температура перегріву елементів інтегральної схеми перетворювача не перевищує 53 °С. Час досягнення усталеного режиму складає 2,4 с.

В усіх експериментальних дослідженнях як досліджуваний газ використовувалось повітря.

**Третій розділ** присвячено розробці радіовимірювальних перетворювачів витрат газу на основі польових і біполярних транзисторів з витраточутливими напівпровідниковими діодами та на основі біполярних транзисторів з витраточутливими елементами з біполярних транзисторів.

Електрична схема радіовимірювального перетворювача витрат газу подана на рис.1. Вона складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2, які разом з індуктивністю L1 ємностями C1-C3 утворюють автогенератор. Через резистори R1-R3 здійснюються живлення приладу за допомогою джерел постійної напруги U1 і U2. Чутливими елементами витрати газу використовують транзистори VT1 і VT2.

Еквівалентна ємність на електродах колектора транзистора VT1 і колектора біполярного транзистора VT2 разом із індуктивністю L1 утворюють коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором. Під час дії потоку газу на транзистори VT1 і VT2 змінюється еквівалентна ємність і динамічний опір коливального контуру автогенератора перетворювача, що викликає зміну частоти генерації пропорційній витратам.

### Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального перетворювача витрат газу

На основі еквівалентної схеми перетворювача визначена функція перетворення. Вона описує залежність частоти генерації від витрат газу та має вигляд

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4LC_{\text{екв}}(R_o(Q)C_{\text{екв}}(Q))^2}}{2LC_{\text{екв}}(R_o(Q)C_{\text{екв}}(Q))^2}}, \quad (6)$$

де  $A_1 = (C_{\text{екв}}(Q)R_o(Q))^2 + R_o^2(Q)C_{\text{екв}}(Q)C_{\text{екв}}(Q) - LC_{\text{екв}}$ ,  
 $C_{\text{екв}}(Q), R_o(Q)$  – еквівалентна ємність і динамічний опір коливального контуру перетворювача. На рис. 2 подана теоретична та експериментальна залежності частоти генерації перетворювача від витрат газу.

### Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від витрат газу при дії на два біполярних транзистора

Чутливість пристрою визначається на основі виразу (6) і описується рівнянням

(7)

де

### Рис. 3. Залежність чутливості від витрат газу

Графік залежності чутливості від витрат газу представлений на рис.3. Як видно з графіка, найбільша чутливість пристрою лежить в діапазоні від 10 до 30 л/год та змінюється від 1,5 до 1,0 кГц/л/год.

**У четвертому розділі** розроблено радіовимірювальні перетворювачі витрат газу з активним індуктивним елементом на основі біполярного і польового транзисторів та двох біполярних транзисторів, що дало змогу покращити метрологічні параметри перетворювачів і здійснити виготовлення приладів за інтегральною технологією. Розроблені математичні моделі, за допомогою яких отримані вольт-амперні характеристики, залежності активної та реактивної складових повного опору, частоти генерації та чутливості від впливу витрат газу, від режимів живлення та проведені їх експериментальні дослідження.

Схему радіовимірювального перетворювача витрат газу з активним індуктивним елементом подано на рис. 4.



Транзистори VT1, VT2 і VT3 реалізують генератор електричних коливань, в якому коливальний контур утворено ємнісною складовою повного опору на електродах стік-колектор транзисторів VT1 і VT2 та індуктивною складовою повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT3. Таким чином, схема перетворювача повністю реалізується у вигляді інтегральної схеми.

**Рис. 4. Електрична схема радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі польового і біполярного транзисторів з активним індуктивним елементом**

Функція перетворення визначається з еквівалентної схеми перетворювача і описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4L_{ekv}C_{GD}(C_D(Q)R_E(Q))^2}}{2L_{ekv}C_{GD}(R_E(Q)C_D(Q))^2}}, \quad (8)$$

де  $B_1 = L_{ekv}C_{GD} - (C_D(Q)R_E(Q))^2 - C_{GD}C_D(Q)R_E^2(Q)$ ,  $L_{ekv}$  – еквівалентна індуктивність активного елемента,  $C_D, R_E$  – дифузійна ємність та опір витраточутливих діодів VD1 і VD2,  $C_{GD}$  – ємність затвор-стік польового транзистора VT1. Графічна залежність функції перетворення подана на рис. 5.

**Рис. 5. Залежність частоти генерації від витрат газу**

Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (8) і описується рівнянням

$$(9)$$

де.

**Рис. 6. Залежність чутливості перетворювача від витрат газу**

Графік залежності чутливості пристрою від витрат газу подано на рис. 6. Як видно із графіка, чутливість перетворювача складає 500-1300 Гц/л/год.

Для покращення метрологічних параметрів було розроблено радіовимірювальний перетворювач витрат газу, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2, які утворюють ємність коливального контуру, та біполярного транзистора VT3 з RC-колом, що утворює індуктивний опір коливального контуру. Витраточутливими елементами виступають транзистори VT1, VT2, VT3, що дозволяє значно підвищити чутливість перетворювача. Електрична схема пристрою подана на рис. 7.

**Рис. 7. Електрична схема радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу з активним індуктивним елементом**

Залежність частоти генерації від витрат газу визначається згідно еквівалентної схеми перетворювача. Функція перетворення описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 4R_4^2C_3C_{bx1}R_g^2(Q)C_{ekv}^2(Q)C_{bx2}(C_{bx1} + C_{bx2})}}{2R_4^2C_3C_{bx1}R_g^2(Q)C_{ekv}^2(Q)C_{bx2}}}, \quad (10)$$

де  $A_1 = R_g^2(Q)C_{bx2}C_{ekv}^2(Q) + R_4^2C_{ekv}(Q)C_{bx1}C_{bx2} + C_{bx1}R_g^2(Q)C_{ekv}^2(Q) - R_4^2C_3C_{bx1}C_{bx2}$ .

### Рис. 8. Теоретична та експериментальна залежності частоти генерації від витрат газу

Графічна залежність функцій перетворення в порівнянні з експериментальним її визначенням представлені на рис. 8. Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (10) та описується рівнянням

(11)

де

Графік залежності чутливості поданий на рис. 9.

### Рис. 9. Залежність чутливості від витрат газу

Згідно графіку, найбільша чутливість пристрою лежить від 0,1 до 25 л/год і складає 1000-1750 Гц/л/год.

У п'ятому розділі запропоновано використання розроблених пристроїв у системі вимірювання витрат газу в нафтогазовій промисловості, в якій вимірювання витрат газу здійснюють радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Розроблена принципова схема вимірювального блоку для постійного контролю витрат газу, яка складається з 8-розрядного мікроконтролера AT90S23113 фірми ATMEL, монітора скиду KP1171СП42, інтерфейсу програмування контролера, кварцового резонатора, та термостату, який підтримує стабільну температуру перетворювача в межах  $53^{\circ}\text{C} \pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . Визначено апроксимовану залежність частоти генерації від впливу витрат газу, яка описана аналітичною функцією. Розраховано похибки радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу. Визначено сумарну похибку системи вимірювання витрат газу, яка становить  $\delta_{\Sigma} = \pm 1,7\%$ , мультиплікативна похибка радіовимірювального мікроелектронного перетворювача в діапазоні виміру витрат газу від 0 до 80 л/год змінюється від 0,2 % до 0,4 %, адитивна похибка вимірювання для цього ж діапазону виміру витрат газу змінюється від 0,6 % до 0,8 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі у науковому плані розроблено математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом на основі нелінійних еквівалентних схем, що дозволило отримати вольт-амперні характеристики, функції перетворення і рівняння чутливості розроблених пристроїв.

В практичному плані створено новий клас радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів газу з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, які працюють в широкому діапазоні частот від  $10^3$  до  $10^7$  Гц.

Розроблено пакет прикладних програм в обчислювальному середовищі «Matlab 6.5» для моделювання та розрахунків характеристик перетворювачів з врахуванням залежності параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем пристроїв від впливу витрат газу.

### ОТРИМАНО ТАКІ ОСНОВНІ НАУКОВІ І ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ:

1. Вперше запропоновано використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором для створення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, що працюють за принципом "витрати газу – частота".

2. Вперше розроблено математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом, в яких на відміну від існуючих, врахована залежність від витрат газу параметрів елементів нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі двох біполярних і МДН- та біполярних транзисторних структур з від'ємним опором, що дало змогу отримати рівняння чутливості та функцію перетворення витрат газу у частоту.

3. Удосконалено математичну модель теплового стану радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу з частотним виходом, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховано тепловий стан як активних, так і пасивних елементів, які складають інтегральну схему пристрою.

4. В результаті математичного моделювання отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерних розрахунків вольт –амперних характеристик, функцій перетворення і чутливості розроблених радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу.

5. Вперше розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом на основі двох біполярних і польового та біполярних транзисторних структур для вимірювання витрат газу від 0 до 80 л/год з чутливістю від 230 до 750 Гц/л/год для перетворювача на основі двох біполярних транзисторів та з чутливістю від 20 до 54 кГц/л/год для перетворювача на основі МДН- та біполярного транзисторів.

6. Вперше розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу на основі двох біполярних та МДН-біполярного транзисторних структур з активним індуктивним елементом для вимірювання витрат газу в діапазоні від 0 до 80 л/год з чутливістю від 1000 до 1750 Гц/л/год для перетворювача на основі двох біполярних транзисторів та з чутливістю від 32 до 56 кГц/л/год для перетворювача на основі МДН- та біполярного транзисторів з активним індуктивним елементом.

7. Розроблено радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом використані для створення вимірювального блоку витрат газу у нафтогазовій промисловості. Сумарна похибка системи вимірювання складає  $\pm 1,7\%$ . Аналіз проведених теоретичних та експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку перетворювачів з похибкою  $\pm 5\%$ .

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ющенко Ю.А. Мікроелектронний частотний витратомір на основі біполярного і польового транзисторів / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ярославцев О.О. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №3. – С. 173-175.
2. Ющенко Ю.А. Тепловий витратомір на основі транзисторної структури з від'ємним опором / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2007. – С. 221-223.
3. Ющенко Ю.А. Мікроелектронний витратомір на основі транзисторної структури з активним індуктивним елементом / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №3. – С. 89 – 92.
4. Ющенко Ю.А. Мікроелектронний радіовимірювальний тепловий витратомір газу / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №2. – С. 88 – 93.
5. Ющенко Ю.А. Радіовимірювальний тепловий витратомір газу з частотним виходом. / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 2(12). – С. 12-18.
6. Yushchenko Y.A. Radiomeasuring Thermal Flowmeter of Gas on the basis of Transistor Structure with Negative Resistance / Yushchenko Y.A., Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – 2008. – №4(84). – С. 89-93.
7. Ющенко Ю.А. Тепловий частотний витратомір газу / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми радіоелект-

роніки, телекомунікацій та приладобудування. (СПРТП- 2007). м.Вінниця. 31 травня – червня 2007 року. – С.50-52.

8. Ющенко Ю.А. Огляд сучасного стану вимірювання витрат речовини на основі теплових методів / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В.// Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "Перспективні напрямки науки і техніки"-2007. Пшемишль, Польща. 16-13 листопада 2007 року. – С.74-79.

9. Ющенко Ю.А. Вольт-амперна характеристика радіовимірювального теплового витратоміра газу з активно індуктивним елементом / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В.// Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції „Наука і технології – крок у майбутнє” -2008. м.Прага. Чехія; 1-15 березня 2008 року. – С.58-63.

10. Ющенко Ю.А.Радіовимірювальний пристрій витрат газу / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції” Перспективні інновації у науці, освіті, виробництві і транспорті”. м. Одеса, 20-30 червня 2008 року. – С.26-30.

11. Ющенко Ю.А. Радіовимірювальний перетворювач витрат газу / Ющенко Ю.А., Осадчук В.С., Осадчук О.В. // Тези Міжнародної науково-технічної конференції „Датчики, прилади та системи-2008”. м.Ялта, Крим. 4-20 вересня 2008 року. – С. 95-96.

12. Витратомір газу. Патент 24002.Україна МКІ G01 F1/34. Осадчук В.С., Осадчук О.В, Ющенко Ю.А.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т; № U200702067. Заявлено 26.02.2007.Опубліковано 11.06.2007.Бюл.№8. – 4 с.

13. Мікроелектронний вимірювач витрати газу. Патент 24005. Україна МКІ G01 F1/34. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ющенко Ю.А.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т; №U200702076. Заявлено 26.02.2007. Опубліковано 11.06.2007. Бюл.№8. – 4 с.

14. Мікроелектронний пристрій для виміру витрати газу. Патент 26479 Україна МКІ G01 F1/34. Осадчук В.С., Осадчук О.В, Ющенко Ю.А., Ярославцев О.О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т; №U200704955. Заявлено 03.05.2007. Опубліковано 25.09.2007. Бюл.№15. – 6 с.

15. Мікроелектронний витратомір газу. Патент.29964 Україна МКІ G01 F1/34. Осадчук В.С., Осадчук О.В, Ющенко Ю.А., Ярославцев О.О.; заявник та патентовласник Вінницький нац. техн. ун-т; №U200704522. Заявлено 23.04.2007. Опубліковано 11.02.2008. Бюл.№ 2. – 4 с.

## АНОТАЦІЯ

Ющенко Ю.А. Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.08 – радіовимірювальні прилади. Вінницький національний технічний університет, Вінниця – 2009.

Дисертаційна робота присвячена розробці нового класу радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом на основі напівпровідникових структур з від’ємним опором, принцип роботи яких базується на функціональній залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором від впливу витрат газу, що надає можливість виготовлення та створення конкурентноспроможних зразків цієї продукції.

У дисертаційній роботі розроблені теоретичні підходи до створення мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом у вигляді біполярних та МДН- і біполярних транзисторних структур на основі розв’язку рівняння Кірхгофа, основних положень теорії комплексної змінної, що дало можливість отримати залежність активної і реактивної складових повного опору, функції перетворення та рівняння чутливості від впливу витрат газу та доведено, що ці залежності є суттєвими для створення нового класу радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з поліпшеними метрологічними та економічними показниками. Вперше розроблені математичні моделі радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив витрат газу на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі біполярних і МДН- та біполярних транзисторних структур з від’ємним

опором, що дало змогу отримати рівняння чутливості і функції перетворення витрат газу у частоту. Розроблено пакет прикладних програм для моделювання та розрахунків характеристик розроблених радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу.

Ключові слова: радіовимірювальний мікроелектронний перетворювач витрат газу, частота, витрати газу, функція перетворення, чутливість.

## АННОТАЦІЯ

Ющенко Ю.А. Радиоизмерительные микроэлектронные преобразователи расхода газа с частотным выходом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.08 – радиоизмерительные приборы. Винницкий национальный технический университет, Винница – 2009.

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических основ и практической реализации нового класса радиоизмерительных микроэлектронных преобразователей расхода газа с частотным выходом на основе полупроводниковых структур с отрицательным сопротивлением, принцип работы которых основан на функциональной зависимости реактивных свойств транзисторных структур с отрицательным сопротивлением от воздействия расхода газа, что дает возможность создания и разработки конкурентоспособных образцов этой продукции.

Большинство сенсоров расхода газа являются аналоговыми, при помощи которых расходы газа преобразуются в электрический сигнал в форме напряжения или тока. Радиоизмерительные сенсоры расхода газа с частотным выходом имеют ряд преимуществ перед аналоговыми, которые заключаются в значительном увеличении помехоустойчивости, что позволяет повысить точность измерения, а также в возможности получения больших выходных сигналов, что создает предпосылки отказа от усилительных устройств при последующей обработке сигнала. Использование частотного сигнала в качестве информативного позволяет отказаться от аналого-цифровых преобразователей, что повышает эффективность радиоизмерительной аппаратуры.

В диссертационной работе разработаны теоретические подходы по созданию радиоизмерительных микроэлектронных преобразователей расхода газа с частотным выходом в виде биполярных и МДП- и биполярных транзисторных структур. На основе решения системы уравнений Кирхгофа, составленных на базе нелинейных эквивалентных схем преобразователей, основных положений теории комплексной переменной, получены зависимости активной и реактивной составляющих полного сопротивления, функции преобразования и уравнения чувствительности от влияния расхода газа и доказано, что эти зависимости являются существенными для создания нового класса радиоизмерительных микроэлектронных преобразователей расхода газа на основе полупроводниковых структур с отрицательным сопротивлением с улучшенными метрологическими и экономическими показателями. На основе анализа физических процессов, которые возникают в результате разогрева, усовершенствована тепловая модель радиоизмерительного микроэлектронного преобразователя на основе биполярных транзисторных структур.

Гибридная интегральная микросхема преобразователя с расходочувствительными элементами на основе транзисторов состоит из двух комплементарных биполярных транзисторов, составляющих схему автогенератора. Эквивалентная емкость, которая возникает на электродах коллекторов биполярных транзисторов и внешняя индуктивность создают колебательный контур, частота генерации которого зависит от расхода газа. Для улучшения параметров преобразователя разработана автогенераторная схема на основе МДП- и биполярного транзистора.

Дальнейшее улучшение метрологических параметров радиоизмерительных преобразователей возможно при использовании биполярных и МДП- и биполярных транзисторных структур с активным индуктивным элементом на основе биполярного транзистора с  $RC$ -цепью. Это позволяет полностью применить интегральную технологию при создании преобразователей, а также повышает чувствительность и точность преобразования расхода газа в частотный сигнал.

Впервые разработаны математические модели, в которых учтено влияние расхода газа на элементы нелинейных эквивалентных схем преобразователей на основе биполярных и МДП- и биполяр-

ных транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, которые описаны системами уравнений, на основе которых определены функции преобразования и уравнения чувствительности.

Разработаны пакеты прикладных программ в вычислительной среде "Matlab 6.5" для моделирования и вычислений характеристик разработанных радиоизмерительных микроэлектронных преобразователей расхода газа. Анализ теоретических и экспериментальных исследований подтвердил адекватность разработанных моделей с погрешностью  $\pm 5\%$ . Предложено использование микроэлектронных преобразователей расхода газа в нефтегазовой промышленности. Рассчитаны погрешности радиоизмерительных преобразователей расхода газа, а также определена суммарная погрешность системы измерений, которая составляет  $\pm 1,7\%$ .

Ключевые слова: радиоизмерительный микроэлектронный преобразователь расхода газа, частота, расход газа, функция преобразования, чувствительность.

## ABSTRACT

Yushchenko Y.A. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Flow Rate of Gas with Frequency Output. –A manuscript.

A thesis for a candidate of technical sciences degree by speciality 05.11.08 – radiomeasuring equipments. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2009.

Dissertation work is devoted to development of theoretical bases and practical implementation of the new class of radiomeasuring microelectronic transducers of flow rate of gas with a frequency output on the basis of semiconducting structures with negative resistance, the principle of which operation is based on a functional connection of reactive properties of transistor structures with negative resistance from effect of flow rate of gas, that enables creation and development competitive is model of this production.

In the dissertation the theoretical approaches for creation of radiomeasuring microelectronic transducers of flow rate of gas with a frequency output as bipolar and MOS and bipolar transistor structures are designed on the basis of the decision of a Kirgoff equation, fundamental points of the theory of a complex variable, that has enabled to receive dependences of an active and reactive component of complete resistance, functions of conversion and equation of sensitivity from influence of flow rate of gas and is proved, that these dependences are essential for creation of the new class of microelectronic transducers of flow rate of gas on the basis of semiconducting structures with negative resistance with improved metrology and economic metrics. Mathematical models for the first time are designed, in which the influence of flow rate of gas to elements of nonlinear equivalent circuits of transducers is taken into account on the basis of bipolar and MOS and bipolar transistor structures with negative resistance, which are described by set of equations, on the basis of which the functions of conversion and equation of sensitivity are defined.

The application packages for simulation analysis and calculations of the characteristics of designed radiomeasuring microelectronic transducers of flow rate of gas are designed.

Keywords: a radiomeasuring microelectronic transducer of flow rate of gas, frequency, flow rate of gas, function of conversion, sensitivity.

Підписано до друку 5.03.2009 р. Формат 29.7×42 ¼  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Умовн. друк. арк. 0.9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. № 2009-050

Надруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: (0432) 59-81-59