

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.317

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. В. Осадчук, д. т. н., доц.;

Ю. А. Ющенко

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ВИТРАТОМІР НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Показано можливість перетворення витрат газового середовища на основі автогенераторного пристрою, що складається з трьох біполярних транзисторів, а також електричного моста, в плечі якого включені чутливі елементи на основі напівпровідникових діодів. Отримані аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість розробленого витратоміра з частотним виходом складає 32...56 кГц/л/год.

Вступ

Подальший розвиток сенсорної техніки потребує все досконаліших приладів для моніторингу навколишнього середовища, автоматизації технологічних процесів, дослідження космічного простору, ядерної енергетики, медицини тощо. Одним із напрямків покращення метрологічних характеристик сенсорів є застосування частоти як інформативного параметра. Сенсори з частотним виходом мають низку переваг перед аналоговими, які полягають у значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє збільшити точність вимірювання, а також у можливості отримання великих вихідних сигналів. Це дозволяє відмовитись від підсилювальних пристроїв у подільшому обробленні сигналів. Використання частотного сигналу як інформативного дозволяє відмовитись від аналого-цифрових перетворювачів, що підвищує економічність вимірювальної апаратури [1].

В даний час ведуться інтенсивні дослідження з вивчення властивостей аналогових витратомірів [2—4]. Разом з тим, дослідження характеристик витратомірів з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором знаходяться на початковій стадії. Тому у роботі досліджуються основні параметри витратомірів газового середовища на основі вищезгаданих структур.

Експериментальні та теоретичні дослідження

Електрична схема мікроелектронного витратоміра показана на рис. 1. Вона є гібридною інтегральною схемою і складається з трьох біполярних транзисторів $VT1$, $VT2$ і $VT3$,

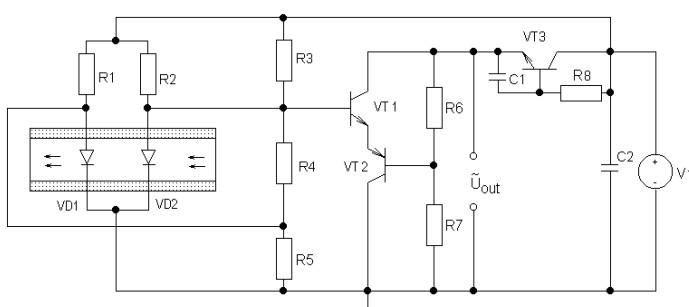


Рис. 1. Схема мікроелектронного витратоміра на основі транзисторної структури з активним індуктивним елементом

безкорпусних транзисторів КТ307, що дозволяє отримати високу точність перетворювача у порівнянні з приладами, що вимірюють температуру на основі диференціальних термобатарей [2]. Дана схема

опорів $R3—R8$, а також моста, який містить опори $R1—R2$ та термочутливі діоди $VD1$ і $VD2$. Діоди $VD1$ і $VD2$ розташовані у вимірювальній теплоізолювальній трубці $1,0 \times 0,1$ см, яка виготовлена із сталі марки X18H01T, довжина якої дорівнює 80 мм. Вимірювальна трубка захищена кожухом. Нагрівач виконаний з проволу ПЭВММ $\varnothing 0,05$ мм, довжина обмотки 8 мм. Діоди виготовлені на основі

дозволяє реалізувати автогенераторний пристрій, в якому коливальний контур складається з еквівалентної ємності повного опору на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів $VT1$ і $VT2$ та активного індуктивного елемента на основі транзистора $VT3$ з фазозсувним колом $R8C1$ [5]. При проходженні потоку повітря через вимірювальну трубку відбувається зміна температури термочутливих діодів $VD1$ і $VD2$, яка пропорційна кількості витрат повітря, що пройшло через вимірювальну трубку. Зміна температури діодів викликає зміну вихідної напруги моста, що приводить до зміни еквівалентної ємності коливального контуру, а це викликає зміну резонансної частоти автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються від'ємним опором [6].

Оскільки у роботі пристрою використано активний індуктивний елемент, то розглянемо фізичний механізм роботи такого елемента на основі біполярного транзистора $VT3$ з фазозсувним колом $R8C1$, що дозволяє регулювати величину індуктивності і добротності елемента.

Виникнення індуктивних властивостей у біполярних структурах пов'язане з кінцевою швидкістю руху носіїв заряду в базовій області. Сигнал, прикладений до емітера, не може з'явитися на колекторному переході поки носії заряду проходять базу, в результаті чого виникає затримка в часі, яка отримала назву часу прольоту. Таким чином, струм колектора відстає в часі від напруги на емітері, яка викликала цей струм, що відповідає індуктивній реакції на електродах емітер-колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності і добротності визначається на основі нелінійної моделі індуктивного транзистора, заснованої на моделі Еберса-Молла, яка отримана із загальної математичної моделі транзистора. Вихідними даними для даної моделі є система основних рівнянь, що описують поведінку носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі, а також математичні співвідношення, які характеризують поведінку р-п переходів. Індуктивність теоретичної моделі залежить від електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу бази, режиму живлення транзистора за постійною і змінною напругами, а також від геометричних розмірів транзистора, що дозволяє керувати її величиною як електричним, так і технологічним шляхами. Зовнішні параметри транзистора, які безпосередньо не пов'язані із процесами перенесення носіїв заряду, такі як: бар'єрні ємності емітерного і колекторного переходів, омичний опір базової області, індуктивності виводів, — істотно впливають на величину індуктивності, що виникає в процесі перенесення носіїв заряду в базовій області. Включення зовнішнього $R8C1$ -кола до транзистора $VT3$ дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з одного боку, а з іншого боку — повністю реалізувати як активний індуктивний елемент, так і весь пристрій за інтегральною технологією.

Величина еквівалентної індуктивності активного елемента визначається виразом [5]

$$L_{ekv} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{A_4 A_1 - A_3 A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (1)$$

$$\text{де } A_1 = \omega C_1 \left[(r_B + r_E - R_8 \alpha_1)^2 - (R_8 \alpha_2)^2 + \frac{1}{(\omega C_1)^2} \right]; \quad A_2 = \omega C_1 [2 R_8 \alpha_2 (r_B + r_E - R_8 \alpha_1)];$$

$$A_3 = \left[R_8 \alpha_1 (r_B + r_E - R_8) + (r_B + r_E) \frac{R_8^2}{r_K} - 2 \frac{R_8^3}{r_K} \alpha_1 + \frac{R_8^2 \alpha_2^2}{(\omega C_1)^2} \right];$$

$$A_4 = \left[2 R_8^2 \alpha_1 \alpha_2 - (r_B + r_E) R_8 \alpha_2 + \frac{2 R_8^3}{r_K} \alpha_2 \right]; \quad \alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_\alpha)^2} \text{ — дійсна складова коефіцієнта}$$

передачі струму в схемі із загальною базою; $\alpha_2 = \frac{\alpha_0 f/f_\alpha}{1 + (f/f_\alpha)^2}$ — уявна складова коефіцієнта пе-

редачі струму в схемі із загальною базою; r_b , r_K — відповідно опір бази і колектора транзистора $VT3$, f_α — гранична частота біполярного транзистора в схемі із загальною базою; f — робоча частота; $\omega = 2\pi f$ — кругова частота.

Добротність активного індуктивного елемента визначається за формулою

$$Q = \frac{(A_4 A_1 - A_3 A_2) \omega C_1}{\omega C_1 (A_3 A_1 + A_4 A_2) - (A_1^2 + A_2^2)}. \quad (2)$$

Розглянемо залежність опору і ємності термочутливих діодів від температури. Згідно з теорією напівпровідникових приладів можна записати [7]

$$R_E = \frac{kT}{qI_E}; \quad (3)$$

$$C_D = I_E \frac{q}{kT} \tau_n, \quad (4)$$

де q — заряд електрона, k — стала Больцмана, T — температура, τ_n — час життя електронів, I_E — струм емітера. В свою чергу, витрати повітря Q залежать від зміни температури таким чином [8]:

$$Q = \left[\frac{1}{K_2} \left(\frac{UI}{T - T_0} - K_1 \right) \right]^n, \quad (5)$$

де K_1 і K_2 — константи приладу; U , I — напруга і струм на діодах; T — температура діодів; T_0 — температура навколишнього середовища, $n \approx 0,5$.

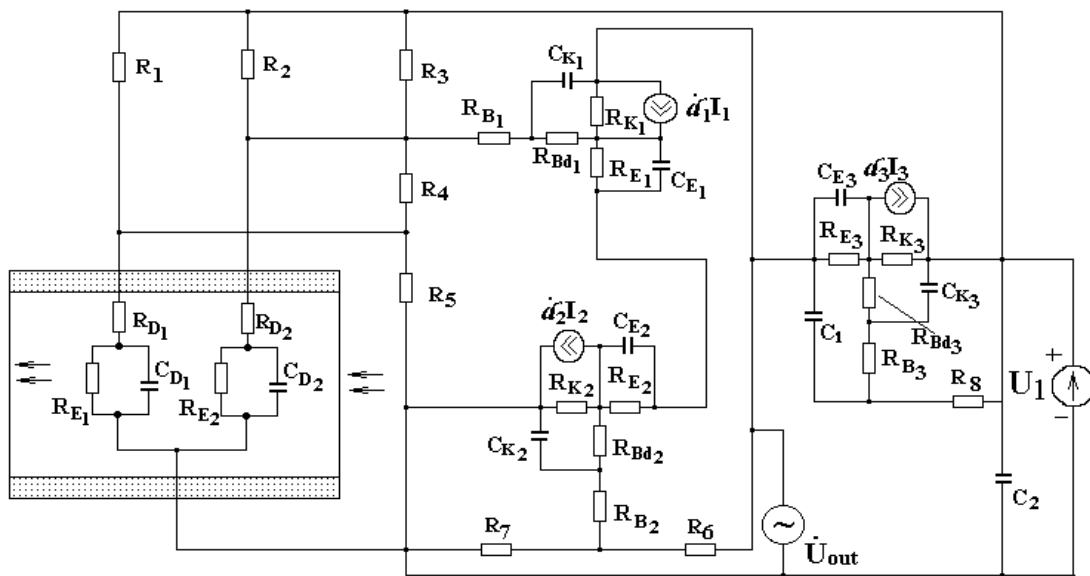


Рис. 2. Еквівалентна схема мікроелектронного витратоміра на основі транзисторної структури з активним індуктивним елементом

Аналитичну залежність функції перетворення можна визначити на основі еквівалентної схеми пристрою, яка показана на рис. 2, виходячи з теорії стійкості Ляпунова [9]. Функція перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1 + 4L_{ekv}C_{K1}(C_D(Q)R_E(Q))^2}}{2L_{ekv}C_{K1}(R_E(Q)C_D(Q))^2}}, \quad (6)$$

де $B_1 = L_{ekv}C_{K1} - (C_D(Q)R_E(Q))^2 - C_{K1}C_D(Q)R_E^2(Q)$; L_{ekv} — еквівалентна індуктивність активного елемента; C_D , R_E — дифузійна ємність та опір термочутливих діодів $VD1$ і $VD2$; C_{K1} — ємність колектор-база біполярного транзистора $VT1$.

Графічна залежність функції перетворення показана на рис. 3.

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

$$\begin{aligned}
S_Q^{F_0} = & -0,0198 \left(-2C_D(Q)R_E^3(Q)C_{K1} \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} - 2C_D^2(Q)R_E^3(Q) \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) - \right. \\
& - 2C_D^3(Q)R_E^2(Q) \left(\frac{\partial R_E(Q)}{\partial Q} \right) - 3C_D(Q)R_E^3(Q)C_{K1} \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) - 2C_{K1}C_D^2(Q)R_E^2(Q) \left(\frac{\partial R_E(Q)}{\partial Q} \right) + \\
& + 8C_D^2(Q)R_E^3(Q)L_{ekv}C_{K1} \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) + 8L_{ekv}C_{K1}C_D^2(Q)R_E^2(Q) \left(\frac{\partial R_E(Q)}{\partial Q} \right) + 4L_{ekv}C_{K1}R_E(Q) \times \\
& \times \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} + 4R_E(Q) \left(\frac{\partial C_D(Q)}{\partial Q} \right) L_{ekv}C_{K1} + 4C_D(Q)L_{ekv}C_{K1} \left(\frac{\partial R_E(Q)}{\partial Q} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} + \\
& \left. + 4L_{ekv}C_{K1}C_D(Q) \left(\frac{\partial R_E(Q)}{\partial Q} \right) \right) / \left(\left(2\sqrt{B_1 + \sqrt{B_1 + 2B_2}} / B_2 \right) L_{ekv}C_{K1}C_D^3(Q)R_E^3(Q)\sqrt{B_1 + 2B_2} \right),
\end{aligned} \quad (7)$$

де $B_2 = 2L_{ekv}C_{K1}(C_D(Q)R_E(Q))^2$.

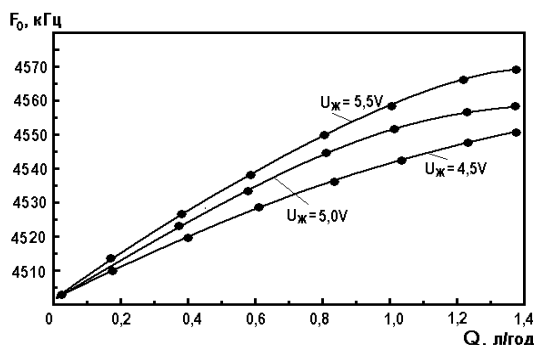


Рис. 3. Залежність частоти генерації від витрат газу

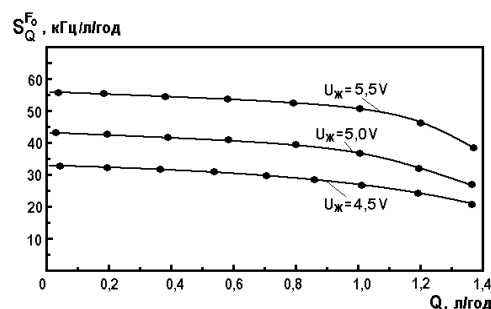


Рис. 4. Залежності чутливості витратоміра від витрат газу

Графік залежності чутливості витратоміра з частотним виходом показано на рис. 4. Як видно з графіка, чутливість пристрою складає 32...56 кГц/л/год.

Висновки

Показано можливість перетворення витрат газового середовища на основі автогенераторного пристрою, що складається з трьох біполярних транзисторів, а також електричного моста, в плечі якого включені чутливі елементи на основі напівпровідникових діодів. Отримано аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що чутливість розробленого витратоміра з частотним виходом складає 32...56 кГц/л/год.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новицкий П. В., Кноринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. — Ленинград: Энергия, 1970. — 424 с.
2. Кремлевский П. П. Расчет и конструирование расходомеров. — Ленинград: Машиностроение, 1978. — 223 с.
3. Пістун Е., Лесовой Л. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. — Львів: ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006. — 570 с.
4. Евтихий Н. Н., Купершмидт Я. А., Папуловский В. Ф., Скугоров В. Н. Измерение электрических и неэлектрических величин. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 349 с.
5. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 275 с.
6. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 303 с.
7. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Радио и связь, 1990. — 264 с.
8. Виглеб Т. Датчики. — М.: Мир, 1989. — 196 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1968. — 720 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 19.03.07
Рекомендована до друку 23.04.07

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри електроніки; **Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри радіотехніки; **Ющенко Юрій Андрійович** — аспірант кафедри електроніки.
Вінницький національний технічний університет