

В. С. Осадчук<sup>1</sup>  
О. В. Осадчук<sup>1</sup>  
Я. О. Осадчук<sup>1</sup>

## РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ СЕНСОР ТИСКУ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ ДВОКОЛЕКТОРНОГО ТЕНЗОТРАНЗИСТОРА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Запропонована конструкція радіовимірювального мікроелектронного сенсора тиску з частотним вихідним сигналом, яка складається з біполярного двоколекторного тензотранзистора і двозатворного польового транзистора, що утворюють автогенераторний пристрій. На основі розв'язку рівняння коливальної системи автогенераторного пристрою сенсора отримано функцію перетворення, що описує залежність резонансної частоти від тиску, та рівняння чутливості. Чутливість сенсора тиску лежить в діапазоні від 1,12 кГц/кПа до 0,65 кГц/кПа.*

**Ключові слова:** радіовимірювальний сенсор тиску, від'ємний опір, частотний вихідний сигнал.

### Вступ

Інтенсивний розвиток різноманітних за будовою та властивостями сенсорів пов'язаний з автоматизацією систем керування, контролем різноманітних технологічних процесів. При цьому дослідження в області створення таких сенсорів спрямовані на покращення їх основних параметрів: підвищення чутливості, лінійності, стабільності, економічності, зменшення часу спрацювання, габаритів, ефективності інтеграції з мікропроцесорними засобами обробки вимірювальної інформації. Такі характеристики можна отримати на основі транзисторних структур з від'ємним опором, в яких відбувається перетворення тиску у частотний сигнал. Проте такий напрямок створення сенсорів тиску не достатньо досліджений. Це стосується як самих схем, так і характеристик первинних перетворювачів тиску з розщепленими електродами, якими є двоколекторні транзистори. Саме ці питання розглядаються в статті.

### Теоретичні та експериментальні дослідження

Розглянемо принцип роботи біполярного двоколекторного транзистора. В анізотропних за провідністю напівпровідникових кристалах напрямки струму і електричного поля в загальному випадку не збігаються. Це означає, що під час руху носіїв заряду між струмовими контактами на них діють сили, які є поперечними до напрямку струму [1]. Причому величина цієї сили у випадку анізотропії, яка наведена зовнішніми направленими впливами, такими як одновісна пружна деформація, магнітне поле, світло, пропорційна величині цих впливів. Таким чином, при штучній анізотропній провідності з'являється можливість керування явищами перенесення носіїв заряду в широкому діапазоні. Практичне використання цієї можливості покладено в основу створення низки напівпровідникових приладів, таких як мікроелектронні багатоколекторні тензорезистори [2, 3] і магнітотранзистори [4, 5], чутливі до одновісної механічної напруги і напруженості магнітного поля. При інжекції носіїв заряду в базову область (площина  $xu$ ) відбувається їх дрейф у продольному тягнучому полі бази і їх дифузія в напрямку  $z$  до колекторних переходів. У відсутності механічної деформації колекторні струми, які визначаються дифузійним рухом у напрямку  $z$ , рівні між собою, тому вихідний сигнал, що змінюється з навантажувальних опорів колекторів дорівнює нулю за однакових значень опорів колекторів. З подачею механічного навантаження на тензорезистор виникає одновісна деформація стиску (розтягу) у кристалографічному напрямку  $\langle 110 \rangle$ , завдяки чому рухливість дірок в базі стає анізотропною. Інжектвані дірки дрейфують у тягнучому полі бази у напрямку  $x$ , за рахунок наведеної анізотропії їх рухливості відхиляються у поперековому напрямку  $y$ , в подальшому за рахунок дифузії в напрямку  $z$  досягають колекторних переходів. Виникнення в базовій області

поперечного потоку дірок за рахунок анізотропії їх рухливості призводить до значного розбалансу колекторних струмів і появи вихідного сигналу.

Розглянемо як змінюється рухливість дірок у напівпровіднику під дією тиску, тобто анізотропію рухливості. У недоформованому напівпровіднику рухливість дірок дорівнює [6]

$$\mu_{p0} = \frac{q\tau}{m_v^{3/2} (m_L^{1/2} + m_M^{1/2})}, \quad (1)$$

де  $q$  — заряд електрона;  $m_v$  — ефективна маса дірки на вершині валентної зони,  $m_L$  та  $m_M$  — ефективні маси легких та важких дірок,  $\tau$  — час релаксації, однаковий для обох типів дірок. Під дією тиску рухливість дірок визначається за виразом [7]

$$\mu_p(p) = \frac{p_1\mu_1 + p_2\mu_2}{p_1 + p_2}, \quad (2)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  — концентрації дірок у верхній та нижній зонах, що розщепилися;  $\mu_1$  і  $\mu_2$  — відповідні рухливості.

Тоді деформаційний приріст рухливості дірок дорівнюватиме [7]

$$\Delta\mu_p(p) = \frac{q\tau}{m_v^{3/2}} \left[ m_L^{1/2} \frac{\left( 1 + \left( \frac{m_M}{m_L} \right)^2 \exp\left( \frac{\Delta E_{v-}(p) - \Delta E_{v+}(p)}{kT} \right) \right)}{\left( 1 + \left( \frac{m_M}{m_L} \right)^{3/2} \exp\left( \frac{\Delta E_{v-}(p) - \Delta E_{v+}(p)}{kT} \right) \right)} - (m_L^{1/2} + m_M^{1/2}) \right], \quad (3)$$

де  $\Delta E_{v+}(p)$  — деформаційний приріст положення вершини валентної зони при деформації;  $\Delta E_{v-}(p)$  — деформаційний приріст нижньої гілки валентної зони при деформації.

Залежність рухливості дірок і електронів у Si-напівпровіднику від тиску подано на рис. 1.

Залежність розподілу інжектованих носіїв заряду від дії тиску в базі тензотранзистора можна визначити на основі розв'язку рівняння перенесення, при цьому розглядається низький рівень інжекції носіїв заряду і слабкі деформаційні поля. Рівняння перенесення має вигляд [3]:

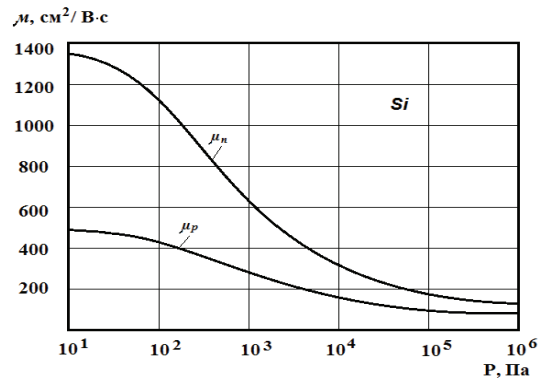


Рис. 1. Залежність рухливості носіїв заряду від тиску

$$\left[ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + 2\sigma_x \frac{\partial p}{\partial x} + 2\sigma_y \frac{\partial p}{\partial y} \right] - \frac{p - p_0}{L^2} = -\rho(x', y') \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') \quad (4)$$

за граничними умовами

$$p(0, y, z) = p(l_x, y, z) = p(x, 0, z) = p(x, L_y, z) = p(x, y, l_z) = p_0, \quad (5)$$

де  $L$  — дифузійна довжина інжектованих в базі носіїв заряду,  $p_0$  — рівноважна концентрації носіїв заряду в базі,  $\delta(x - x')$  — функція Дірака. Функція  $\rho(x', y')$  описує щільність джерел нерівноважних носіїв заряду. Коефіцієнти  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  зв'язані із значенням тягнучого поля  $E_x$  у базі тензотранзистора співвідношеннями

$$\sigma_x = \frac{qE_x}{2kT}; \quad \sigma_y = a \cdot \sigma_x, \quad (6)$$

де  $k$  — стала Больцмана;  $T$  — температура;  $a$  — параметр анізотропії рухливості носіїв заряду.

Область бази і емітера обмежені координатами, відповідно

$$0 \leq x \leq L_x; \quad 0 \leq y \leq L_y; \quad 0 \leq z \leq L_z;$$

$$0 \leq x' \leq L_x; \quad 0 \leq y' \leq L_y; \quad 0 \leq z' \leq L_z.$$

Рівняння (4) розв'язується за допомогою функції Гріна, яка описується виразом [3]

$$P(x, y, z, x', y', z') = \frac{4I_x}{D_p l_y l_z} \exp[a_x(x-x')] \sum_{m,k=1}^{\infty} \frac{\text{sh} \left[ \beta_{mk} \left( 1 - \frac{x}{l_x} \right) \right]}{\beta_{mk} \text{sh}(\beta_{mk})} \text{sh} \left( \frac{\beta_{mk} x'}{l_x} \right) \sin q_k z \sin q_m y \sin q_m y' \sin q_k z', \quad (7)$$

де  $q_m = \frac{\pi m}{l_y}$ ;  $q_k = \frac{\pi k}{l_z}$ ;  $\beta_{mk} = l_x^2 (q_m^2 + q_k^2 + a_x^2 + a_y^2 + L)^2$ ;  $L^2 = D_p \tau$ ;  $D_p$  — коефіцієнт дифузії дірок;  $\tau$  — час життя дірок.

Функція Гріна визначає концентрацію інжектованих дірок у точці бази з координатами  $x, y, z$ , яка породжена джерелом одиничної інтенсивності емітера з координатами  $x', y', z'$ . Щільність джерел, що емітують нерівноважні дірки у базу, визначається за виразом [3]

$$\rho(x', y') = \frac{p_0}{\tau} \left[ \exp \frac{U_{eb}(x', y')}{kT} - 1 \right]. \quad (8)$$

Таким чином, розподіл інжектованих носіїв заряду в базовій області тензотранзистора описується виразом [3]

$$p(x, y, z) = \int_0^{l_x} dx' \int_0^{l_y} dy' \int_0^{l_z} dz' \rho(x', y') p(x, y, z, x', y', z'). \quad (9)$$

На основі виразу (9) визначаються дифузійні струми колекторів, які залежать від механічної деформації тензотранзистора.

Отже, розглянувши принцип роботи двоколекторного тензотранзистора та його основні характеристики, перейдемо до розгляду роботи радіовимірювального сенсора тиску з частотним виходом, схема якого подана на рис. 2 [8, 9]. Вона являє собою гібридну інтегральну схему, яка складається із двоколекторного тензочутливого транзистора і польового двозатворного транзистора, що утворюють автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від тиску, прикладеного до двоколекторного біполярного тензотранзистора.

На електродах першого колектора тензочутливого біполярного транзистора VT1 і стоку польового двозатворного транзистора VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна ємнісний характер. Підключення індуктивності  $L_1$  до першого колектора VT1 і загальної шини через ємність  $C_1$  створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором. Резистори  $R_1, R_2, R_3$  і  $R_4$  забезпечують режим живлення постійним струмом досліджуваної схеми. Під дією тиску на транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, що викликає зміну частоти генерації.

Для визначення функції перетворення сенсора тиску, тобто залежності частоти генерації від тиску, складемо еквівалентну схему пристрою, показану на рис. 3.

На схемі (див. рис. 3) сумарна індуктивність  $L$  містить в собі зовнішню індуктивність  $L_1$  коливального контуру та індуктивності виводів схеми, ємність  $C$  містить в собі зовнішню ємність  $C_1$ , а також внутрішні ємності транзисторів VT1 і VT2 на електродах колектор—стік. Опір  $R$  містить в

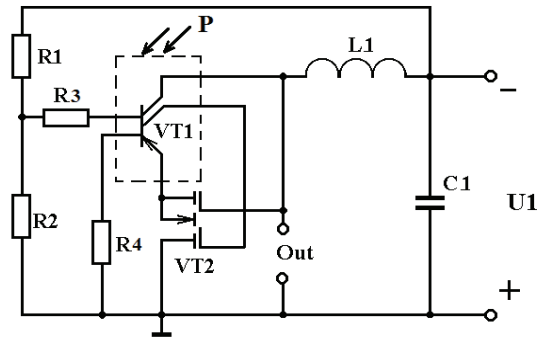


Рис. 2. Електрична схема радіовимірювального сенсора тиску на основі двоколекторного біполярного тензочутливого транзистора

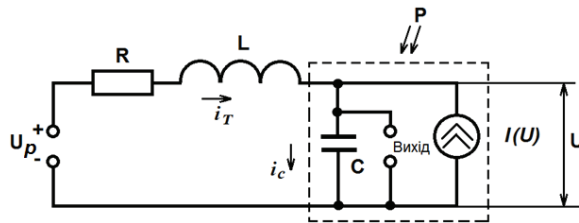


Рис. 3. Еквівалентна схема радіовимірювального сенсора тиску

собі всі опори втрат схеми. Джерело струму  $I(U)$  моделює спадну ділянку вольт-амперної характеристики на виході пристрою.

Еквівалентна схема сенсору тиску (рис. 3) описується рівняннями Кірхгофа

$$U_p = Ri_T + L \frac{di_T}{dt} + U; \quad (10)$$

$$i_T = C \frac{dU}{dt} + I(U). \quad (11)$$

З рівнянь (10) і (11) визначаються складові:

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{U_p - i_T - U}{L}; \quad (12)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{i_T - I(U)}{C}. \quad (13)$$

У стані рівноваги з постійного струму  $(U_0, i_{T0})$  струми і напруги не змінюються у часі, звідки

$$\left. \frac{di_T}{dt} \right|_{i_T=i_{T0}} = 0; \quad \left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0. \quad (14)$$

Використовуючи умови (14), з рівнянь (12) і (13) визначаємо:

$$U_p = i_{T0}R - U_0 = 0; \quad (15)$$

$$i_{T0} - I(U_0) = 0. \quad (16)$$

Стан схеми у відповідності з (15) і (16) реалізується у одній точці перетину спадної ділянки вольт-амперної характеристики і лінії навантаження

$$R = \frac{U_p - U_0}{I(U_0)}, \quad (17)$$

який є станом рівноваги постійного струму досліджуваної схеми.

Для розгляду роботи схеми у динамічному режимі в рівняння (12) і (13) введемо змінні, які мають вигляд

$$u = U - U_0; \quad (18)$$

$$i = i_T - i_{T0}. \quad (19)$$

Нелінійну статичну вольт-амперну характеристику цієї схеми в околі точки рівноваги замінимо лінійною функцією

$$I(U_0 + u) = I(U_0) + u/R_g, \quad (20)$$

де  $R_g$  – диференційний від'ємний опір у точці рівноваги.

Нелінійну смність на електродах перший колектор—стік тензотранзистора VT1 і польового транзистора VT2 в околі точки рівноваги вважаємо сталою величиною, яка не залежить від напруги. У відповідності з цією умовою рівняння (12) і (13) перетворюється у лінійні зі сталими коефіцієнтами:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{Ri}{L} - \frac{u}{L}; \quad (21)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u}{R_g C}. \quad (22)$$

Об'єднання рівнянь (21) і (22) дозволяє отримати диференціальне рівняння другого порядку, яке описує коливальний процес в автогенераторному сенсори тиску

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{R_g C} \right) \frac{du}{dt} + \frac{u}{LC} \left( 1 + \frac{R}{R_g} \right) = 0. \quad (23)$$

Розв'язок рівняння (23) має вигляд

$$u(t) = A \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t + \\ + B \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_g C} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{1}{LC} \left( 1 + \frac{R}{R_g} \right)} \right] t, \quad (24)$$

де  $A$  і  $B$  — коефіцієнти, що визначаються з початкових умов.

Дві складові рівняння (24) описують періодичний процес, амплітуда якого наростає за експоненціальним законом. Умови виникнення синусоїдальних коливань в системі описуються нерівностями

$$\left( \frac{1}{R_g C} + \frac{R}{L} \right) < 0; \quad \frac{1}{LC} \left( \frac{R}{R_g} + 1 \right) > 0. \quad (25)$$

Таким чином, виникнення коливань на резонансній частоті в досліджуваному сенсори тиску буде мати місце за виконання умов (25). Резонансна частота визначається з реактивної складової повного опору на виході, яка на резонансній частоті дорівнює нулю (див. рис. 3). Джерело струму  $I(U)$  у робочій точці пристрою змінюється на величину  $u/R_g$ . Таким чином, функція перетворення, тобто залежність резонансної частоти сенсора від дії тиску описується виразом

$$F(P) = \frac{1}{2\pi R_g C(P)} \sqrt{\frac{R_g^2 C(P)}{L} - 1}. \quad (26)$$

Чутливість визначається на основі виразу (26) і має вигляд

$$S_P^{F_p} = -\frac{1}{2} \frac{\sqrt{\frac{R_g^2 C(P)}{L} - 1} \left( \frac{dC(P)}{dP} \right)}{\pi R_g^2 C(P)} + \frac{1}{2} \frac{\frac{dC(P)}{dP}}{\pi L \sqrt{\frac{R_g^2 C(P)}{L} - 1}}. \quad (27)$$

На рис. 4 показано залежність резонансної частоти від тиску. Як видно з графіка, її залежність від тиску є нелінійною, це пояснюється нелінійною залежністю еквівалентної ємності коливальної системи автогенератора від тиску.

На рис. 5 показано залежність чутливості сенсора від дії тиску. Аналіз графіка показує, що чутливість має максимальне значення 1,12 кГц/кПа і змінюється від 1,12 кГц/кПа до 0,65 кГц/кПа.

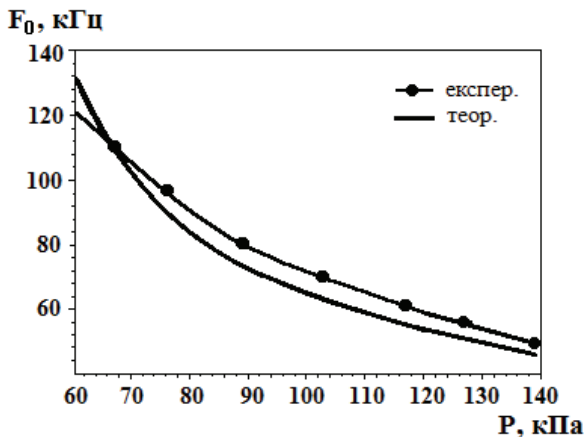


Рис. 4. Залежність резонансної частоти від тиску

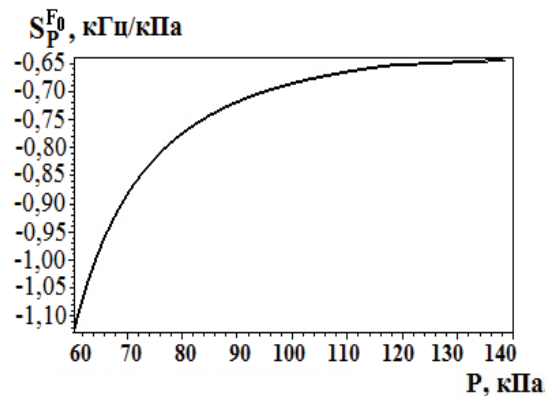


Рис. 5. Залежність чутливості сенсора від тиску

## Висновки

Запропонована конструкція радіовимірювального мікроелектронного сенсора тиску з частотним вихідним сигналом, яка складається з біполярного двоколекторного тензотранзистора і двоазотворного польового транзистора, що утворюють автогенераторний пристрій. На основі розв'язку рівняння коливальної системи автогенераторного пристрою сенсора отримано функцію перетворення, що описує залежність резонансної частоти від тиску, та рівняння чутливості. Чутливість сенсора тиску лежить в діапазоні від 1,12 кГц/кПа до 0,65 кГц/кПа.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко Н. Н. Электрические и фотоэлектрические свойства полупроводников с анизотропной проводимостью / Н. Н. Бойко, В. А. Романов // Физика и техника полупроводников. — 1977. — Т. 11, № 5. — С. 817—835.
2. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе / [Г. Г. Бабичев, В. И. Гузь, И. П. Жадько и др.] // Физика и техника полупроводников. — 1992. — Т. 26. Вип. 7. — С. 1244—1250.
3. Бабичев Г. Г. Вертикальный двухколлекторный тензотранзистор с ускоряющими электрическими полями в базе и эмиттере / Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов // Физика и техника полупроводников. — 1999. — Т. 33, № 3, — С. 370—379.
4. Балтес Г. П. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля / Г. П. Балтес, Р. С. Попович // «ТННЭР». — 1986. — Т. 74, № 8. — С. 60—90.
5. Popovic R. S. Nall effect devices / Popovic R.S. — Bristol; Philadelphia: Institute of Physics. — 2004. — 419 p.
6. Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / А. Л. Полякова. — М. : Энергия, 1979. — 168 с.
7. Баранский П. Н. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов : справ. / Баранский П. Н., Клочков В. П., Потыкевич И. В. — К. : Наукова думка, 1975. — 704 с.
8. Пат. № 2104619 Российская Федерация. МКН НО4R19/04. Электростатический микрофон / Осадчук В. С., Осадчук Е. В., Осадчук А. В. — № 95114269 ; заявл. 8.08.1995; опубл. 10.02.1998, Бюл. № 4. — 3 с.
9. Пат. № 34244А Украина, МКИ Н 04R 19/00. Напівпровідниковий пристрій для виміру тиску / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Осадчук Е. В. — № 99063404 ; заявл. 18.06.1999 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1. — 2 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 19.03.2015

**Осадчук Володимир Степанович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електроніки e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Осадчук Олександр Володимирович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Осадчук Ярослав Олександрович** — студент факультету радіотехніки, зв'язку та приладобудування, e-mail: yaroslav.osa@mail.ru

V. S. Osadchuk<sup>1</sup>  
O. V. Osadchuk<sup>1</sup>  
Ya. O. Osadchuk<sup>1</sup>

## Radio-measuring sensor of pressure with frequency output based on double-collector tenzotransistor

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

The design of radio-measuring microelectronic sensor of pressure with a frequency output, which consists of two collector bipolar tenzotransistors and two gate field-effect transistor, which constitute autogenerating device. On the basis of solutions of oscillatory system of autogenerating sensor device the conversion function is obtained, which describes the dependence of the resonance frequency of the pressure, and the equation of sensitivity. The sensitivity of the pressure sensor is in the range of 1.12 kHz/kPa to 0.65 kHz/kPa.

**Keywords:** radio-measuring sensor of pressure, negative resistance, frequency output signal.

**Osadchuk Volodymyr S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Electronics, e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Osadchuk Oleksandr V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Radioengineering, e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Osadchuk Yaroslav O.** — Student of the Faculty of Radioengineering, Connection and Instrument-Making,  
e-mail: yaroslav.osa@mail.ru

**В. С. Осадчук<sup>1</sup>**  
**А. В. Осадчук<sup>1</sup>**  
**Я. А. Осадчук<sup>1</sup>**

## **Радиоизмерительный сенсор давления с частотным выходом на основе двухколлекторного тензотранзистора**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Предложена конструкция радиоизмерительного микроэлектронного сенсора давления с частотным выходным сигналом, состоящая из биполярного двухколлекторного тензотранзистора и двухзатворного полевого транзистора, которые образуют автогенераторное устройство. На основе решения уравнения колебательной системы автогенераторного сенсорного устройства получена функция преобразования, описывающая зависимость резонансной частоты от давления, и уравнение чувствительности. Чувствительность сенсора давления находится в диапазоне от 1,12 кГц/кПа до 0,65 кГц/кПа.*

**Ключевые слова:** радиоизмерительный сенсор давления, отрицательное сопротивление, частотный выходной сигнал.

**Осадчук Владимир Степанович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроники, e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Осадчук Александр Владимирович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk69@mail.ru;

**Осадчук Ярослав Александрович** — студент факультета радиотехники, связи и приборостроения, e-mail: yaroslav.osa@mail.ru