

АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Розроблено автогенераторний пристрій для вимірювання тиску з тензочутливим резистивним елементом FSR402. Основним фактором, який впливає на зміну функції перетворення та чутливості, є зміна навколишнього тиску. Це змінює як еквівалентну ємність, так і диференційний від'ємний опір коливальної системи нового схемотехнічного рішення, змінюючи вихідну частоту перетворювача. На основі математичного моделювання електричних характеристик розробки отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Чутливість перетворювача змінюється від 42,5 Гц /г/см² до 78,0 Гц/г/см² в діапазоні від 0 до 26 кг/см². Найбільша чутливість приладу лежить у діапазоні від 15 кг/см² до 25 кг/см² і складає 58 -78 Гц/г/см². Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень складає ±2,5%.

Ключові слова: автогенераторний пристрій для вимірювання тиску, частотний перетворювач, тензочутливий резистивний елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

Abstract. An autogenerator device for measuring pressure with a tenzosensitive resistive element FSR402 has been developed. The main factor that affects the change in the conversion function and sensitivity is the change in ambient pressure. This changes both the equivalent capacitance and the differential negative impedance of the oscillating system of the new circuit design, changing the output frequency of the transducer. Analytical expressions for the conversion function and the sensitivity equation were obtained on the basis of mathematical modeling of the electrical characteristics of the development. The sensitivity of the transducer varies from 42.5 Hz/g/cm² to 78.0 Hz/g/cm² in the range from 0 to 26 kg/cm². The highest sensitivity of the device lies in the range from 15 kg/cm² to 25 kg/cm² and is 58-78 Hz/g/cm². The difference between theoretical and experimental studies is ±2.5%.

Key words: self-generating device for pressure measurement, frequency transducer, tenzosensitive resistive element, conversion function, sensitivity equation.

Вступ

Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів є сенсори тиску. В Україні вимірювання тиску є одним із поширених напрямків вимірювань фізичних величин. Тому досить важливим завданням сучасного приладобудування та інформаційно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання тиску для різних виробництв, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [1–4].

Нині розроблено різноманітні варіанти сенсорів для контролю тиску газоподібних та рідких середовищ і тиску в промислових приміщеннях. Перспективним науковим напрямком в цій сфері є створення частотних пристроїв вимірювання тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором, в розвиток теорії якого значний здобуток внесли вітчизняні та закордонні вчені. Саме використання частотного принципу перетворення «тиск-частота» в поєднанні з технологією мікроелектроніки сприяє підвищенню метрологічних та економічних показників перетворювачів тиску, виготовлених у вигляді MEMS інтегральних схем [3, 4]. Отже, розробка та практичне застосування таких пристроїв є актуальною задачею.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Встановлено, що технічний рівень сенсорних систем тиску залежить насамперед від технічних розробок перетворювача, а саме його чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [5 – 8]. Це мотивує для реалізації подальших досліджень. Метою дослідження є розробка пристрою з частотним виходом для вимірювання тиску на основі

напівпровідникових структур з від'ємним диференційним опором (рис. 1). Експериментальним зразком слугував тензочутливий резистивний елемент FSR402.

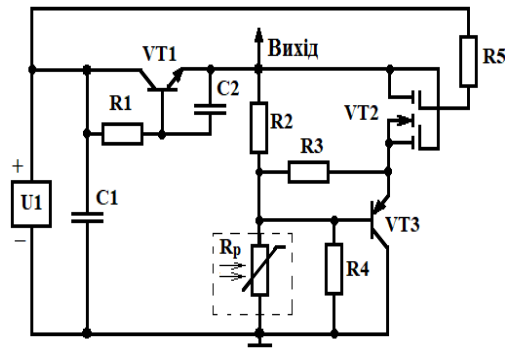


Рис. 1. Електрична схема пристрою з частотним виходом для вимірювання тиску

За допомогою джерела постійної напруги створюється такий режим роботи, коли від'ємний диференційний опір приводить до виникнення електричних коливань в контурі. Від'ємний диференційний опір створюється паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах колектор біполярного транзистора VT3, стоку польового транзистора VT2 та індуктивним характером на електродах емітер-колектор біполярного транзистора VT1, величина якого визначається резистором R1 та конденсатором C2 [9-11].

Резистори R2, R3 та чутливий до тиску резистор R_p утворюють ділянки напруги. Електричне живлення польового транзистора VT2 та біполярного транзистора VT3 залежить від величини зміни опору чутливого до тиску резистора R_p зі зміною тиску навколишнього середовища. Блокувальний конденсатор C1 запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги U1. Резистор R4 слугує для лінеаризації характеристики чутливого до тиску резистора R_p , а резистор R5 – для запобігання пробією підзатворного діелектрика. При дії тиску на чутливий до тиску резистор R_p змінюється ємнісна складова повного опору на електродах стік польового транзистора VT2 та колектор біполярного транзистора VT3, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру [12-14].

Без знання параметрів перетворювачів тиску неможливо їх створити, тому задача полягала в розробці математичної моделі, на основі рішення якої будуть визначені функція перетворення та рівняння чутливості. На основі електричної схеми пристрою з частотним виходом для вимірювання тиску (рис. 1), по колу позитивного зворотного зв'язку визначено рівняння, на основі якого отримано аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{-2A_1 \pm 2\sqrt{A_2A_3 + R^2(P)C^2(P) \cdot (-8A_3A_9 - 4C_{c1}^2A_3 - 8A_4A_6 - 8A_5A_6 + A_{10}) + R^2(P)C(P) \cdot A_{11}}}{2\pi \left(R^2(P)C^2(P) \cdot (4C_{c1}A_8 + 4C_{e1}A_8 + 4A_9C_{gs2} + 4A_9C_{gd2}) + 4A_1R^2(P)C(P) \right)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A_1 &= C_{e1}C_{c1}C_{gd2}C_{gs2}; & A_2 &= C_{e1}^2C_{c1}^2; & A_3 &= C_{gd2}^2C_{gs2}^2; & A_4 &= C_{gd2}^2C_{gs2}; \\ A_5 &= C_{gd2}C_{gs2}^2; & A_6 &= C_{e1}C_{c1}^2; & A_7 &= C_{e1}^2C_{c1}; & A_8 &= C_{gd2}C_{gs2}; & A_9 &= C_{e1}C_{c1}; \\ A_{10} &= -4C_{e1}^2A_3 - 8A_4A_7 - 8A_5A_7 - 8A_2A_8 - 4A_2C_{gs2}^2 - 4A_2C_{gd2}^2; \end{aligned}$$

Позначення, які використовувались в аналітичних виразах, а саме: $R(P)$ – чутливий до тиску резистор; $C(P)$ – ємність чутливого до тиску резистора; C_{e1} – ємність р-п-переходу емітер-база біполярного транзистора VT1; C_{c1} – ємність р-п-переходу колектор-база біполярного транзистора VT1; C_{gd2} – ємність затвор-стік польового транзистора VT2, C_{gs2} – ємність затвор-витік польового транзистора VT2.

На основі виразу (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення автогенераторного пристрою для вимірювання тиску.

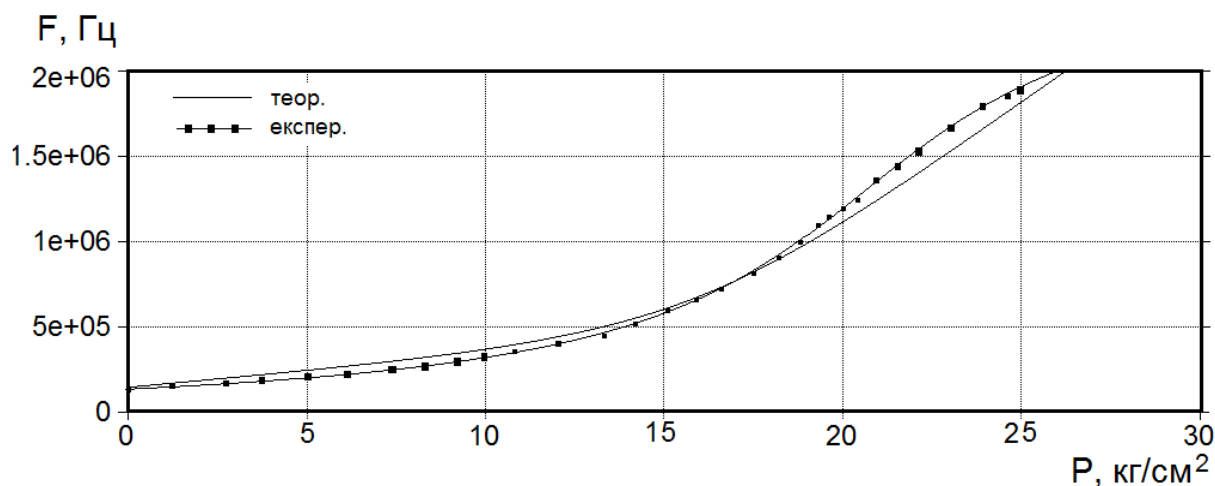


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску

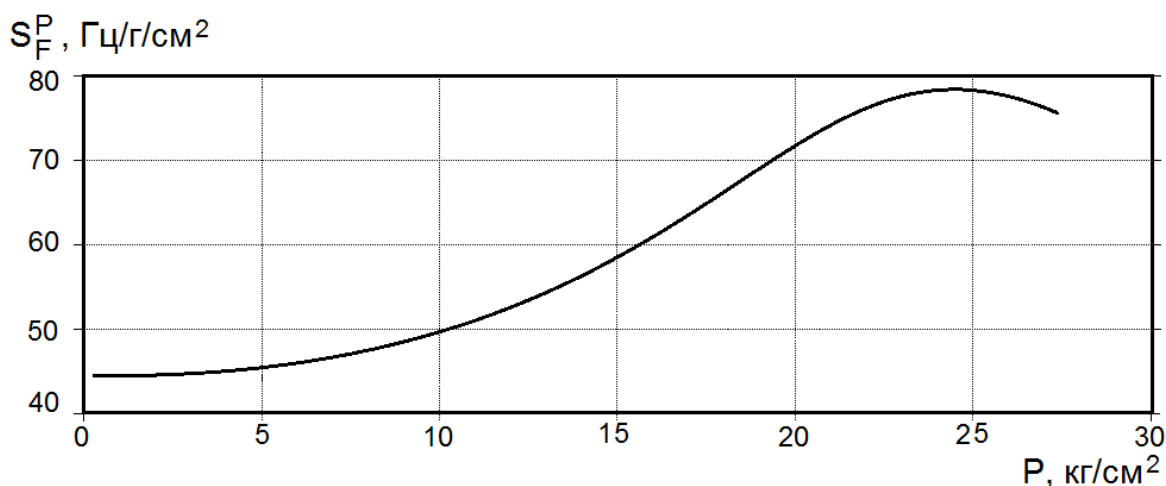


Рис. 3. Залежність чутливості автогенераторного пристрою від зміни тиску

Як видно з рис.3, чутливість перетворювача змінюється від 42,5 Гц /г/см² до 78,0 Гц/г/см² в діапазоні від 0 до 26 кг/см². Найбільша чутливість приладу лежить у діапазоні від 15 кг/см² до 25 кг/см² і складає 58 -78 Гц/г/см². Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень складає $\pm 2,5\%$.

Висновки

1. Запропоновано мікроелектронний автогенераторний перетворювач тиску з частотним виходом на основі мікроелектронних транзисторних структур з диференційним від'ємним опором. Первинним чутливим елементом розробки слугує чутливий до тиску резистор.

2. Розроблено математичну модель мікроелектронного автогенераторного перетворювача тиску з частотним виходом, на основі якої отримано параметричні залежності функції перетворення та чутливості. Основним фактором, який впливає на зміну функції перетворення та чутливості, є зміна навколишнього тиску. Це змінює як еквівалентну ємність, так і диференційний від'ємний опір коливальної системи нового схемотехнічного рішення, змінюючи вихідну частоту перетворювача. Оскільки тиск змінюється в діапазоні від 0 до 30 кг/см², то чутливість мікроелектронного автогенераторного перетворювача тиску з частотним виходом змінюється від 42,5 Гц /г/см² до 78,0 Гц/г/см².

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jena Sudarsana, Gupta Ankur. Review on pressure sensors: a perspective from mechanical to micro-electro-mechanical systems // *Sensor Review*. 2021. 10.1108/SR-03-2021-0106].
2. Schaumburg H. Sensoren, Stuttgart.: Teubner, 1992. –517 p.
3. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. В 3 томах, Львів: Ліга-Прес, 2003. Т.2.
4. Gupta A., Pal P. Flexible sensors for biomedical application // *Environmental, Chemical and Medical Sensors*, Springer, Singapore, 2018. pp. 287-314.
5. Wagner S., Yim C., McEvoy N., Kataria S., Yokaribas V., Kuc A., and all. Highly sensitive electromechanical piezoresistive pressure sensors based on large-area layered // *Nano letters*. 2018. PtSe₂ films.
6. DeHennis, A., Chae J., Baroutaji Ahmad. (2016). Pressure Sensors. 10.1016/B978-0-12-803581-8.00541-5.
7. Pressure Sensors. In: *Handbook of Modern Sensors*. Springer, New York, NY. 2004. https://doi.org/10.1007/0-387-21604-9_10
8. Fang, Liang, Ruoyu Zhang, Hongwei Duan, Jinqiang Chang, Zhaoquan Zeng, Yifu Qian, and Mianzhe Hong. 2023. Resistive Sensing of Seed Cotton Moisture Regain Based on Pressure Compensation // *Sensors* 23, no. 20: 8421. <https://doi.org/10.3390/s23208421>
9. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 275 с.
10. Osadchuk V.S.; Osadchuk, A.V.; Osadchuk, I.A. Microelectronic pressure transducer with frequency output based on tunneling resonance diode // *Bulletin of the Khmelnytsky National University. Engineering Sciences*, 2015 1(221); pp. 97–101.
11. Osadchuk I.A.; Osadchuk, A.V.; Osadchuk, V.S. Semenov, A.O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode // *Proc. of IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 25-29.02.2020, pp. 452-457. doi: 10.1109 / TCSET49122.2020.235474.
12. Osadchuk, A.V., Osadchuk, V.S., Osadchuk, I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor // *Przegląd Elektrotechniczny* 2017, R93(3), pp. 113–116.
13. Osadchuk A. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element / A. Osadchuk, V. Osadchuk, O. Seletska, L. Krylik // *Przegląd Elektrotechniczny*, R.95. – 2019. – N4. – P. 237 – 241, doi:10.15199/48.2019.04.45.
14. Осадчук О. В. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, Я. О. Осадчук // *Прикладні питання математичного моделювання*. – 2020. – Т. 3, № 2.1. – С. 206–215.

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

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

Осадчук Володимир Степанович – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

Крилик Людмила Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

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

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

Osadchuk Volodymyr Stepanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.vs38@gmail.com

Krylyk Lyudmyla Viktorivna - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Science, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com