

Д. ф.-м. н. І. М. ВІКУЛІН¹, д. т. н. Л. Ф. ВІКУЛІНА², к. т. н. П. Ю. МАРКОЛЕНКО¹,
к. ф.-м. н. О. А. НАЗАРЕНКО¹

Україна, м. Одеса, ¹Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку;

²Одеський Державний аграрний університет

E-mail: markolenko@ukr.net

ЗБІЛЬШЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ТА РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СЕНСОРІВ-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТОРІВ НА ОДНОПЕРЕХІДНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Експериментально досліджено вплив температури та радіації на характеристики генераторів на основі одноперехідного транзистора (ОПТ). Для підсилення залежності частоти від температури в коло емітера ОПТ та бази вводяться польові транзистори. Максимальна чутливість з прямою залежністю частоти від температури та максимальна компенсація дії радіації на вихідний сигнал досягається при включенні в коло емітера ОПТ польового МДН-транзистора, а в коло бази — польового транзистора з *p-n*-переходом. Встановлено також граничні величини потоків різних випромінювань, вище яких генератор перестав працювати.

Ключові слова: сенсор-перетворювач, одноперехідний транзистор, польовий транзистор, температурна залежність, радіаційна стійкість.

Датчик є обов'язковим елементом приладів вимірювання, систем контролю, регулювання та інших. За типом вихідного сигналу датчики температури поділяються на два типи: у перших вихідним параметром є струм або напруга, що залежать від температури, у других вихідним параметром є частота змінного сигналу.

Перетворення сигналу з датчика в низку послідовних імпульсів, частота яких залежить від рівня вимірюваного впливу, є оптимальним для обробки інформації на ЕОМ. Частотно-модульований сигнал зручний для прямого підключення мікропроцесорних систем, оскільки не потребує аналого-цифрового перетворення. Це дозволяє створювати радіовимірювальні перетворювачі за стандартною інтегральною технологією і дає можливість підвищити швидкість дії, точність і чутливість, розширити діапазон величин, що вимірюються, підвищити надійність, перешкодостійкість і довготривалу стабільність параметрів [1].

Найбільш перспективними датчиками з частотним виходом є датчики з використанням релаксаційного генератора на одноперехідному транзисторі (ОПТ) [2–4]. Схема генератора та структура ОПТ наведені на рис. 1.

Принцип дії генератора досить простий. Після ввімкнення джерела живлення з електрорушійною силою E її частина падає на опорі нижньої частини бази r_B . Потенціал бази навпроти емітера дорівнює U_B , напруга на конденсаторі емітера — нулю, а *p-n*-перехід включений у зворотному напрямку. Конденсатор починає заряджатися через опір R_E . Як тільки напруга U_E перевищить U_B , *p-n*-перехід буде ввімкнений у прямому напрямку та почне інжектувати в базу дірки, які заливають нижню частину бази, а r_B зменшуватиметься. Це знизить U_B і ще сильніше збільшить напругу на *p-n*-переході. Такий лавиноподібний процес призводить до розрядки конденсатора, після чого процес повторюється. Вихідний імпульсний сигнал знімається з резистора R_B . Період коливань практично дорівнює часу зарядки конденсатора, тому частота

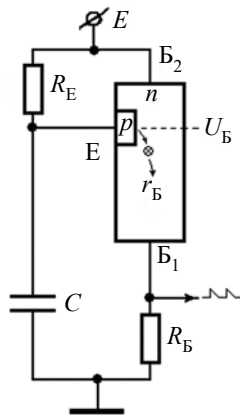


Рис. 1. Схема генератора на ОПТ

де C — ємність конденсатора;
 I_E, U_B — струм емітера та напруга вмикання емітера;
 U_3 — залишкова напруга на базі в увімкненому стані при максимальному зменшенні її опору до r_{B1} (мінімальний опір при інжекції).

$$f \approx \frac{I_E}{C(U_B - U_3)}, \quad (1)$$

Відповідно, $U_B = I_B r_{B0}$, $U_3 = I_B r_{B1}$, де r_{B0} — вихідний опір бази до інжекції носіїв заряду з емітера. Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді

$$f \approx \frac{I_E}{C I_B (r_{B0} - r_{B1})}. \quad (2)$$

Термочутливість такого датчика визначається залежністю від температури різниці $r_{B0} - r_{B1}$, яка є досить малою, тому чутливість є слабкою.

Метою цієї роботи є збільшення термочутливості та радіаційної стійкості датчиків на основі генератора на ОПТ із частотним виходом заміною пасивних резисторів на термочутливі польові транзистори.

Термочутливі генератори з польовими транзисторами

Для збільшення термочутливості можна замість резистора R_E ввести у базу польовий транзистор (ПТ) у двополюсному включенні (затвор замкнутий з витокком). Такі ПТ з $p-n$ -переходом в ролі затвора (ПТ1) та МДН-типу (ПТ2) виконують функції генераторів струму (струм не залежить від напруги) та мають протилежну залежність струму від температури.

Струм насичення через ПТ у двополюсному ввімкненні [5] визначається як

$$I_S = \chi \mu n^2, \quad (3)$$

де μ , n — рухливість та концентрація основних носіїв струму в каналі відповідно;

χ — постійна, яка не залежить від температури та визначається геометричними розмірами польового транзистора.

У напівпровіднику n -типу концентрація електронів дорівнює $n = n_i + n_n$, де n_i , n_n — концентрації власних та домішкових носіїв заряду відповідно. Концентрація носіїв заряду домішки у ПТ1 набагато більша за власну концентрацію, тому $n \approx n_n$ й практично не залежить від температури. Рухливість μ зі зростанням температури зменшується внаслідок збільшення кількості зіткнень носіїв заряду з атомами, що визначає зменшення струму I_S зі зростанням температури [6, с. 117].

Експериментально досліджувалися генератори на основі промислових ОПТ типу КТ117Г з ПТ1 типу 2П202 в колі емітера (рис. 2, а) та конденсатором ємністю 6,8 пФ.

Температурні залежності частоти для датчиків, схеми яких представлені на рис. 2, наведено на рис. 3. Для датчика з оберненою залежністю $f(T)$ при збільшенні температури T від 0 до 100°C частота лінійно зменшується від 14 до 3 кГц (рис. 3, крива 1), що відповідає формулі (2), де I_E — струм через ПТ1. Чутливість такого датчика становить 100–120 Гц/°C.

На практиці частіше використовуються датчики з прямою залежністю частоти від температури. У таких датчиках коло емітера ОПТ містить ПТ МДН-типу (рис. 2, б). Такі транзистори виготовляються з використанням напівпровідників з низькою концентрацією домішки. Тому зростання концентрації власних носіїв зі збільшенням температури забезпечує зростання струму I_S та, як наслідок, призводить до збільшення частоти f . Рухливість носіїв при цьому зменшується так само, як і в ПТ1, але меншою мірою, ніж концентрація. В експериментальних датчиках цього типу (рис. 2, б) використовувалися МДН-транзистори КП305А. Термочутливість датчика при такому ж самому конденсаторі становила 100–200 Гц/°C, але залежність $f(T)$ вже не є лінійною (рис. 3, крива 2). Для досягнення лінійності в коло між затвором і витокком вводиться резистор, що поліпшує лінійність, але чутливість при цьому знижується (крива 3). Для

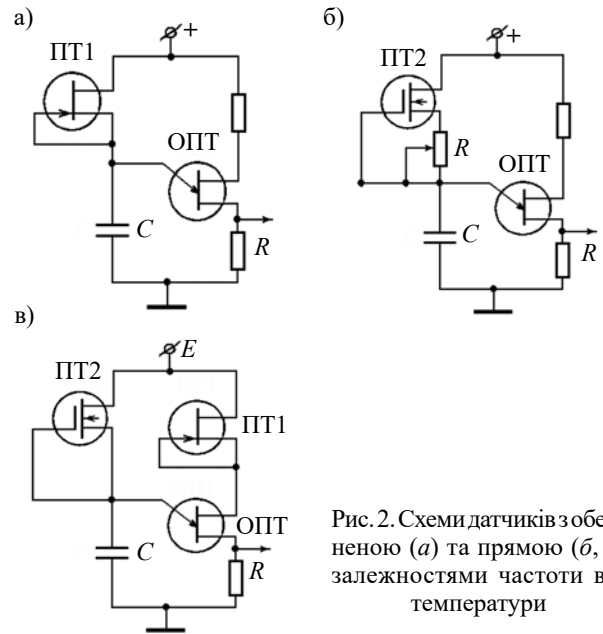


Рис. 2. Схеми датчиків з оберненою (а) та прямою (б, в) залежностями частоти від температури

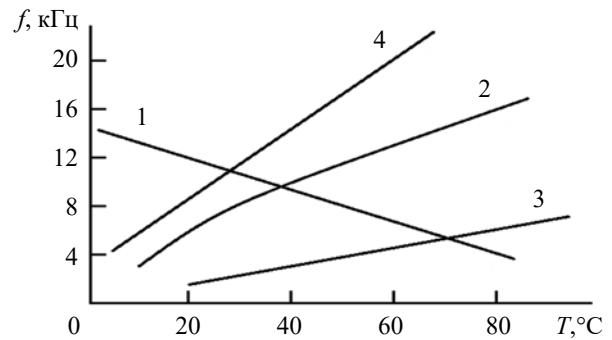


Рис. 3. Залежність частоти від температури для схем датчиків, представлених на рис. 2:

1 — рис. 2, а; 2 — рис. 2, б без резистора ($R=0$ Ом); 3 — рис. 2, б з резистором $R=400$ Ом; 4 — рис. 2, в

збільшення чутливості в коло бази ОПТ вводиться ПТ з $p-n$ -переходом в ролі затвора (рис. 2, в), струм через який зі зростанням температури зменшується (I_B у формулі (2)), що призводить до додаткового зростання частоти та поліпшення лінійності залежності $f(T)$ (рис. 3, крива 4).

Вплив радіації на термочутливі генератори

Оскільки датчики температури використовуються не тільки в звичайних умовах, а й в умовах радіаційного опромінення, розглянемо вплив радіації на їхні параметри [7, 8].

Для вивчення такого впливу транзистори датчиків опромінювалися потоком електронів з енергією 5 МеВ, γ -квантами з енергією 1 МеВ та потоком нейтронів з енергією 1,1 МеВ.

Дія випромінювання на ОПТ складається з впливу на $p-n$ -перехід емітера та опір бази r_B , тому найбільш чутливим до радіації параметром є остаточна напруга на $p-n$ -переході емітера у ввімкненому стані $U_O \approx I_E r_{B1}$.

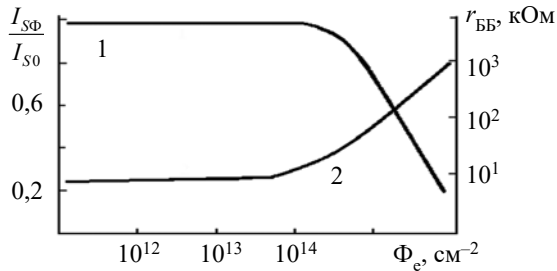


Рис. 4. Залежність струму насичення ПТ з $p-n$ -переходом (1) та міжбазового опору ОПТ (2) від потоку електронів

Під дією радіації опір $r_{БІ}$ зростає через зменшення концентрації як основних носіїв (рис. 4), так і носіїв заряду, інжекттованих $p-n$ -переходом. Останнє пов'язане з тим, що, по-перше, під дією радіації в $p-n$ -переході емітера виникають шунтувальні дефекти, які зменшують коефіцієнт інжекції, і, по-друге, зменшується час життя інжекттованих носіїв в базі, що призводить до зменшення глибини їх проникнення в базу. Всі ці ефекти призводять до зростання U_O .

Збільшення U_O під дією радіації призводить до зменшення ділянки з від'ємним диференціальним опором на ВАХ ($U_B - U_O$) та зростанню частоти генерації. Так, наприклад, частота звичайного генератора на ОПТ (з резистором в колі емітера) після опромінення потоком електронів $\Phi_e \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ з енергією 4 МеВ збільшувалася з 350 Гц до 1,8 кГц при температурі 295 К, а термочутливість зростала від 4,8 до 29,5 Гц/°С. При подальшому зростанні потоку величина $U_B - U_O$ зменшується настільки, що генерація взагалі не виникає.

На рис. 4 показано, як впливає потік електронів на співвідношення струму насичення польового транзистора з $p-n$ -переходом I_{SF} та струму до опромінення I_{S0} . Як відомо [9], опромінення призводить до утворення дефектів у кристалічній структурі напівпровідника, що спричинює зменшення рухливості та концентрації носіїв заряду в каналі, а отже, і зменшення струму насичення ПТ1. Це призводить до зменшення частоти датчика на рис. 2, а, де ПТ1 включений в коло емітера ОПТ. Таким чином, ПТ1 частково компенсує вплив радіації на вихідну частоту датчика на ОПТ, тобто послаблює дію радіації.

Опромінення МДН-транзисторів призводить до утворення в діелектрику електронно-діркових пар. Більш швидкі електрони прямують або до металу затвора, або до напівпровідника (залежно від полярності напруги на затворі), а дірки частково захоплюються ловушками діелектрика та утворюють позитивний заряд. Цей заряд збільшує концентрацію електронів у n -каналі, а опромінення безпосередньо самого каналу зменшує її. Таким чином, залежно від співвідношення цих двох ефектів і якщо $\Phi_e < 10^{14} \text{ см}^{-2}$, струм I_S при опроміненні може як зменшуватися, так і збільшуватися у невеликих межах.

Однак у разі великих потоків спостерігається однозначне зменшення I_S подібно до залежності на рис. 4. Аналогічне зменшення відбувається і при опроміненні γ -квантами та нейтронами. При цьому потоку електронів 10^{14} см^{-2} відповідає потік нейтронів 10^{13} см^{-2} або γ -випромінювання дозою 10^5 Р .

У схемі з двома ПТ (рис. 2, в) при опроміненні одночасно зі зменшенням знаменника у формулі (2) зменшується також чисельник (тобто струм), а відхилення частоти після радіаційного впливу стає менше. При цьому гранична величина потоку опромінення, вище якої генератор перестає працювати (визначається ОПТ), не змінюється. Необхідно зазначити, що досліджувалися транзистори у стандартних металевих корпусах, і якщо використовувати безкорпусні транзистори, граничні потоки зменшаться.

Висновок

Експериментальні дослідження датчиків температури з частотним виходом на основі генератора на одноперехідному транзисторі з двома струмозадальними резисторами та конденсатором показали, що заміна резисторів двома польовими транзисторами у двопольосному включенні (затвор замкнутий із витоком) з протилежними знаками зміни струму від температури дозволяє багатократно збільшити термочутливість датчика. Це також дозволяє створювати датчики із протилежними знаками зміни частоти від температури. Також показано, що опромінення однаковою потоком по-різному впливає на характеристики складових транзисторів датчика. В комплексі це дозволяє компенсувати вплив радіації на вихідну частоту датчика.

Таким чином, використання польових транзисторів у схемі термочутливого генератора на одноперехідному транзисторі дозволяє не лише поліпшити метрологічні характеристики датчика температури, а й підвищити радіаційну стійкість.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Виглеб Г. Датчики. М., Мир, 1989, 196 с.
2. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Ишанин Г.Г. Датчики : справочное пособие. Черкаси, Брама-Україна. 2008, 1072 с.
3. Вербицкий В.Г., Воробієнко П.П., Курмашев Ш.Д. та ін. Разработка высокоэффективных технологий оптоэлектроники. Київ, Логос, 2009, 301 с.
4. Chen Yx., Liu J., Xiao K. et al. Unijunction transistor on silicon-on-insulator substrate. 2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT), Kunming, China, 2020, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278352>
5. Vikulin I.M., Vikulina L.F., Gorbachev V. E., Mikhailov N. S. Temperature stable radiation-resistant current reference generator based on field-effect transistors. Radioelectronics and Communications Systems. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 310–318. <https://doi.org/10.3103/S0735272721060042>

6. Мокріцький В.А., Маслов О.В. *Фізико-технічні основи мікроелектроніки. Т. 1.* Одеса: Екологія, 2018, 204 с.

7. Кулаков В.М., Ладыгин Е. А., Шаховцев В. И. и др. *Действие проникающей радиации на изделия электронной техники.* М., Сов. Радио, 1980, 234 с.

8. Горбачова Г.В., Марколенко П.Ю. Дія іонізуючого випромінювання на частотні перетворювачі температури. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції*

“Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє”. Україна, Одеса, 2019, с. 83–86.

9. Вікулін І.М., Горбачов В.Е., Назаренко О.А. Радіаційно-чутливий детектор на основі польових транзисторів. *Вісті вищих навчальних закладів. Радіоелектроніка*, 2017, т. 60, № 9, с. 515–520. <https://doi.org/10.3103/S0735272717090035>

Дата надходження рукопису
до редакції 30.10 2023 р.

DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.35
UDC 621.382

I. M. VIKULIN¹, L. F. VIKULINA², P. Yu. MARKOLENKO¹,
O. A. NAZARENKO¹

Ukraine, Odesa, ¹State University of Intellectual Technologies and Communications,
²Odesa State Agrarian University
E-mail: markolenko@ukr.net

INCREASING THE SENSITIVITY AND RADIATION RESISTANCE OF TEMPERATURE SENSOR-CONVERTERS USING GENERATORS BASED ON UNIJUNCTION TRANSISTORS

The authors experimentally study the influence of temperature and radiation on the characteristics of generators based on a unijunction transistor (UJT). It is shown that when using a UJT-based generator as a sensor-converter with a frequency output, field-effect transistors are placed into the UJT emitter and base circuits to increase the dependence of frequency on temperature. Maximum sensitivity with direct dependence of frequency on temperature is achieved when a field-effect MOS transistor is connected to the emitter circuit UJT, and a field-effect transistor with a p-n junction is connected to the base circuit. The influence of radiation on the thermal sensitivity of generators is studied. The component transistors are irradiated with a flow of electrons, γ -quanta and neutrons. It is established that the irradiation of each transistor has a different effect on the initial frequency of the generator; it either decreases or increases. It is shown that it is possible to reduce the dependence of the output frequency on radiation using a transistor generator circuit with the opposite sign of the change in the generator frequency due to radiation. Maximum compensation for the effect of radiation on the output signal can be obtained by using a MOS transistor in the UJT emitter circuit, and a transistor with a p-n junction in the base circuit. The study establishes the limit values for fluxes of various radiations, after which the generator stops working.

Keywords: sensor converter; unijunction transistor; field-effect transistor; temperature dependence; radiation resistance.

REFERENCES

1. Vigneb G. *Datchiki* [Sensors]. M., Mir, 1989, 196 p. (Rus)
2. Sharapov V.M., Polishchuk E.S., Ishanin G.G. *Datchiki : spravocnoye posobiye*. [Sensors : reference guide]. Cherkasy, Brama-Ukraine. 2008, 1072 p. (Rus)
3. Verbyts'kyi V.H., Vorobiyenko P.P., Kurmashev Sh.D. et al. *Rozrobka vysokoefektyvnykh tekhnolohiy optoelektroniky* [Development of highly efficient technologies of optoelectronics]. Kyiv, Logos, 2009, 301 p. (Ukr)
4. Chen Yx., Liu J., Xiao K. et al. Unijunction transistor on silicon-on-insulator substrate. *2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, Kunming, China, 2020, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICSICT49897.2020.9278352>
5. Vikulin I.M., Vikulina L.F., Gorbachev V. E., Mikhailov N. S. Temperature stable radiation-resistant current reference generator based on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 310–318. <https://doi.org/10.3103/S0735272721060042>
6. Mokrits'kyi V.A., Maslov O.V. *Fizyko-tekhnichni osnovy mikroelektroniky. T. 1.* [Physical and technical foundations of microelectronics, vol. 1]. Odesa, Ecology, 2018, 204 p. (Ukr)
7. Kulakov V.M., Ladygin Ye. A., Shakhovtsev V. I. et al. *Deystviye pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki* [The effect of penetrating radiation on electronic products]. M.: Sov. Radio, 1980, 234 p. (Rus)
8. Horbachova H.V., Markolenko P.Yu. [The effect of ionizing radiation on frequency temperature converters]. *IX International Scientific and Practical Conference “Infocommunications – Present and Future”*. Ukraine, Odesa, 2019, pp. 83–86. (Ukr)
9. Vikulin I.M., Gorbachev V.E., Nazarenko A.A. Radiation-sensitive detector based on field-effect transistors. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 515–520. <https://doi.org/10.3103/S0735272717090035> (Ukr)

Опис статті для цитування:

Вікулін І. М., Вікуліна Л. Ф., Марколенко П. Ю., Назаренко О. А. Збільшення чутливості та радіаційної стійкості сенсорів-перетворювачів температури на основі генераторів на одноперехідних транзисторах. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 3–4, с. 35–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.35>

Cite the article as:

Vikulin I. M., Vikulina L. F., Markolenko P. Yu., Nazarenko O. A. Increasing the sensitivity and radiation resistance of temperature sensor-converters using generators based on unijunction transistors. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 3–4, pp. 35–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.35>