

УДК 621.3.088

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-11

**Мороз С.А., Чалий В.Д., Лишук В.В., Ткачук А.А., Горайчук А.А.**

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

### **АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЧУТЛИВІСТЬ ПІРОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЙМАЧІВ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ У ДАВАЧАХ РУХУ**

*В статті проведений аналіз одного з різновидів давачів, які використовуються в технологіях Smart City. Зокрема розглянуті давачі на основі піроелектричних приймачів, що реєструють теплове випромінювання, зокрема випромінювання людського тіла. Встановлено, що для оцінки ефективності роботи приймачів випромінювання використовується ряд характеристик, досить важливими з яких є чутливість та поріг чутливості. Наведені математичні відношення, які описують чутливість приймача як комплексну частотну характеристику, що пов'язує реакцію піроелектричного приймача та вплив на нього у вигляді гармонійного потоку. Представлені характеристики порогу чутливості приймача та формули для визначення даної характеристики. Встановлено, що для визначення порогу чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання необхідно знати рівень шумів його чутливого елемента. Для виведення відповідних формул представлена еквівалентна схема піроелектричного приймача. Встановлені джерела шумів піроелектричних елементів, зокрема тепловий (джонсонівський) шум навантажувального опору, тепловий (джонсонівський) шум опору діелектричних втрат чутливого елемента, шумова ЕРС вимірювальної схеми, ввідний шумовий струм вимірювальної схеми, температурний шум чутливого елемента. Подана графічна залежність величини шумів від різних джерел для типового детектора з електричною та тепловою постійними часу. Зроблені відповідні висновки за результатами аналізу.*

**Ключові слова:** піроелектричний приймач, теплове випромінювання, давач, чутливість, шуми завод.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з широким застосуванням сучасних електронних пристроїв здійснюється істотна «інтелектуалізація» різноманітних давачів фізичних величин. Ці засоби перестають бути просто допоміжними і набувають нових властивостей, що робить істотний вплив на використання таких давачів в контексті розвитку технологій Smart City. Smart City (Розумне місто) – це концепція об'єднання багатьох електронно-комунікаційних та інформаційних технологій, враховуючи системи Інтернету речей для управління та контролю за інфраструктурою міста. За рахунок використання давачів, які інтегровані у різноманітні системи у режимі реального часу, отримані дані обробляються та аналізуються. Зібрана інформація є ключем до вирішення поставлених завдань.

Для виконання завдань, які потрібно вирішувати в рамках проєктів Smart City використовуються різноманітні пристрої, як сприймають зовнішню інформацію різних типів. Одними з таких пристроїв є давачі на основі піроелектричних приймачів теплового випромінювання, зокрема людського тіла.

Як відомо, [1, 2] інфрачервоними називаються електромагнітні хвилі з довжиною хвилі  $\lambda > 0,76$  мкм. Оскільки рівень випромінювання людського тіла вкрай низький то технічні засоби виявлення, завдяки своїй конструкції, мають на кілька порядків більшу чутливість.

В даний час виготовляються піроелектричні перетворювачі різноманітних типів, що включають різні детектори теплового випромінювання, тепловізійні матриці і піровидикони, анемометри, хроматографічні детектори, тощо. Обсяги виготовлення пристроїв, робота яких побудована на піроелектричному ефекті постійно збільшуються, також розширюються сфери їх застосування [3].

**Аналіз останніх досліджень.** В різних інформаційних джерелах [4-6] для оцінки ефективності роботи приймачів випромінювання використовується ряд характеристик, найважливішими є: чутливість, імпульсна функція, перехідна характеристика, інерційність, швидкодія, спектральна чутливість, зонна характеристика, динамічний діапазон, поріг чутливості ( $NEP$ ,  $NEI$ ), виявна здатність.

Додатковими характеристиками є: - спектр шумів; величина сигналу, що може бути отриманий; характеристика насичення; температурні залежності параметрів приймача; взаємозв'язок між зазначеними та іншими характеристиками.

© Мороз С.А., Чалий В.Д., Лишук В.В., Ткачук А.А., Горайчук А.А.

Чутливість піроелектричних приймачів теплового випромінювання визначається відношенням величин вихідного сигналу до впливу потоку випромінювання  $\Phi(t)$ . Вихідним сигналом піроелектричних приймачів може бути або струм  $I$  або напруга  $V$  (рисунок 1). У першому випадку чутливість називається ампер-ватною і позначається  $R_I$ , у другому – вольт-ватною та позначається  $R_V$ . Типова чутливість  $R_I$  піроелектричних елементів діаметром 2 мм та ємністю 30 пФ становить  $\sim 1$  мкА/Вт. Загалом обидві чутливості залежать від частоти модуляції  $\omega$  потоку випромінювання  $\Phi(t)$  і описуються комплексною частотною характеристикою  $K(\omega) = R(\omega) \cdot \exp[i\psi(\omega)t]$ .

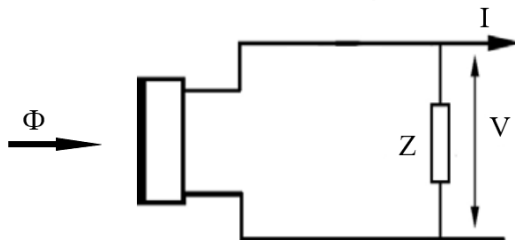


Рисунок 1 – Спрощена схема приймача теплового випромінювання:  
 $\Phi$  – потік випромінювання;  $I$  – електричний струм, що виникає;  $V$  – напруга

Функція  $K(\omega)$  пов'язує реакцію приймача та вплив на нього у вигляді гармонійного потоку  $\Phi(t) = \Phi \exp(i\omega t)$ :

$$V(\omega, t) = K(\omega) \Phi \exp(i\omega t). \quad (1)$$

Вихідний сигнал при спектрі впливу, що дорівнює  $C_F(\omega)$ , задається виразом у вигляді інтеграла Фур'є:

$$V(t) = (1/2\pi)^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\omega) C_F(\omega) \exp \exp(i\omega t) d\omega. \quad (2)$$

Поріг чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання (або еквівалентна шуму потужність - noise equivalent power,  $NEP$ ) визначається величиною потоку випромінювання  $\Phi_{min}$ , сигнал, що викликає в приймачі, рівний середньоквадратичному значенню його загального шуму  $\langle V_N^2 \rangle^{1/2}$ :

$$\Phi_{min} = \langle V_N^2 \rangle^{1/2} / R_V = NEP. \quad (3)$$

Поріг чутливості (або  $NEP$ ) визначає мінімальний сигнал, який може бути зареєстрований. При реєстрації однорідного потоку випромінювання:  $\Phi = A\varphi$  ( $\varphi$  – густина потоку випромінювання) більш відповідною характеристикою є  $NEI$  (noise equivalent irradiance) – еквівалентна шуму опроміненість (щільність потоку випромінювання):

$$NEI = NEP/A, \quad (4)$$

де  $A$  – площа приймача.

$NEI$  дає можливість порівнювати здатність реєстрації даного падаючого випромінювання чутливого елемента різних розмірів.  $NEP$  визначається зазвичай для даної частоти та одиничної смуги пропускання і виражається у Вт Гц<sup>-1/2</sup>. Іноді  $NEP$  визначається як відношення шуму широкосмугового до чутливості при заданій частоті, в цьому випадку  $NEP$  виражається в Вт. Аналогічно,  $NEI$  виражається у Вт·см<sup>-2</sup>·Гц<sup>-1/2</sup> або Вт·см<sup>-2</sup>.

**Мета роботи.** Метою статті є аналіз факторів, які впливають на чутливість піроелектричних приймачів теплового випромінювання у давачах руху; опис поняття чутливості для ІЧ-давачів; розгляд існуючих шумів які можуть мати суттєвий вплив на чутливий елемент давачів руху; формулювання висновків та рекомендацій для практичного використання у процесі проектування та виготовлення давачів руху.

**Викладення основного матеріалу.** Як вже було вказано вище одним з основних характеристик ефективної роботи таких пристроїв є чутливість. Для визначення порога чутливості піроелектричних приймачів теплового випромінювання необхідно знати рівень шумів його чутливого елемента, еквівалентна схема якого представлена (рисунок 2) конденсатором з ємністю  $C_g$  і тангенсом кута діелектричних втрат  $\tan \delta$ .

Зазвичай виділяють наступні джерела шумів піроелектричних елементів.

1) Тепловий (джонсонівський) шум навантажувального опору  $R_s$  який визначається

формулою Найквіста:

$$U_{NR}^2 = \frac{4k_B T R_a \Delta f}{1 + \omega^2 C_S^2 R_a^2} \quad I_{NR}^2 = \frac{4k_B T \Delta f}{R_a}, \quad (5)$$

де  $f = \omega/2\pi$  – частота напруги, що реєструється,  $\Delta f$  – робоча полоса пропускання приймача

Джонсонівський шум – це середньоквадратична напруга на резисторі, зумовлена хаотичним тепловим рухом у ньому електронів.

2) Тепловий (джонсонівський) шум опору діелектричних втрат чутливого елементу визначається узагальненою формулою Найквіста у разі довільних дисипативних систем. При  $C_S \gg C_a$  цей шум визначається формулою:

$$U_{ND}^2 = \frac{4k_B T t g \delta \Delta f}{\omega C_S (1 + t g^2 \delta)} \approx \frac{4k_B T t g \delta \Delta f}{\omega C_S} \quad I_{ND}^2 = 4k_B T C_S \omega t g \delta \Delta f. \quad (6)$$

У загальному випадку джонсонівські шуми кола із сумарним адмітансом  $Y = g + i\omega Cg$  визначаються формулою:

$$U_{NJ}^2 = \frac{4k_B T g \Delta f}{g^2 + \omega^2 C_g^2} \quad I_{NJ}^2 = 4k_B T g \Delta f. \quad (7)$$

де  $g$  – електропровідність паралельно з'єднаних активного опору навантаження  $R_a$  (з провідністю  $g_R = 1/R_a$ ) та чутливим елементом (з провідністю на змінному струмі  $g_D = C_S t g \delta$ ).

При  $\omega = \omega_c = 1/(R_a C_S t g \delta)$  виконується рівність  $g_R = g_D$ , ця частота лежить зазвичай в діапазоні 0,1 ÷ 10 Гц, вона визначає полосовий фільтр між резистивними та діелектричними шумами. При  $\omega \gg \omega_c$  переважають шуми діелектричних втрат, а при  $\omega \ll \omega_c$  переважають шуми навантажувального опору. Тому при високих частотах ( $\omega > 1/\tau_E$ ,  $\omega_c$ ) і  $C_S \gg C_a$  питома виявна здатність визначається формулою:

$$D^* = \frac{R_V (\Delta f A^{1/2})}{(U_{NJ}^2)^{1/2}} = \frac{\eta p^\sigma}{d^{1/2} (4k_B T)^{1/2} C_V (\epsilon \epsilon_0 t g \delta)^{1/2} \omega^{1/2}}. \quad (8)$$

Для досягнення максимальних величин  $D^*$  у цій області частот необхідно збільшувати параметр піроелектричної якості  $M_D = p^\sigma / C_V (\epsilon \epsilon_0 t g \delta)^{1/2}$ . Слід зазначити, що для деяких кристалів (наприклад, LiTaO<sub>3</sub>)  $\epsilon$  і  $t g \delta$  у аналізованій області частот практично не залежать від частоти, проте це виконується не завжди. Так, для полімерних і деяких керамічних матеріалів спостерігаються помітні зміни  $\epsilon$  і  $t g \delta$  з частотою, що впливає на величину шуму, що розглядається.

3) Шумова ЕРС  $((U_{NV}^2)^{1/2})$  вимірювальної схеми

4) Вхідний шумовий струм  $((I_{NI}^2)^{1/2})$  вимірювальної схеми

Параметри 3 та 4 залежать від параметрів та режиму роботи вхідного транзистора. Мінімальні значення шумової ЕРС на низьких частотах (10 ÷ 20) Гц становлять  $\sim 10$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>, а значення шумового струму  $\sim (2 \div 3) \cdot 10^{-16}$  А/Гц<sup>1/2</sup>. За своєю природою шумовий струм є, переважно, дробовим шумом, що у колі затвора польових транзисторів. Залежність шумового струму від затворного струму  $I_e$  добре описується формулою Шоттки:

$$I_{NI}^2 = 2e I_e \Delta f. \quad (9)$$

5) Температурний шум чутливого елементу, який пов'язаний з флуктуаціями у ньому температури, що виникають через статистичну природу теплообміну між чутливим елементом і навколишнім середовищем. Для простої моделі піроелектричного приймача із зосередженими параметрами температурний шум визначається флуктуаціями теплового потоку, що падає на поверхню приймача:

$$(U_{NT}^2)^{1/2} = \frac{R_V (4k_B T^2 G_{th} \Delta f)^{1/2}}{\eta}. \quad (10)$$

Встановлено, що температурний шум є одним із складових частин шуму діелектричних втрат. Це означає, що існує такий механізм діелектричних втрат, який кількісно пов'язаний з

тепловими втратами і призводить до додаткового опору електричних втрат, еквівалентних шумової напруги  $(U_{NT}^2)^{1/2}$ . Цей механізм пов'язаний з електротермічною взаємодією, що виявляється у взаємному впливі піроелектричного та електрокалоричного ефектів на електричні та теплові процеси у піроелектриках.

Повна середньоквадратична напруга шумів  $U_N^2$  може бути записано у вигляді:

$$U_{NT}^2 = U_{NR}^2 + U_{ND}^2 + U_{NV}^2 + U_{NI}^2 + U_{NT}^2. \quad (11)$$

Кожен із цих джерел шумів представлений на еквівалентній схемі як генератора напруги чи струму (рисунок 2, а). Залежність величини шумів від різних джерел для типового детектора з електричною та тепловою постійними часу більшими за 1 мс подана на рисунку 2, б.

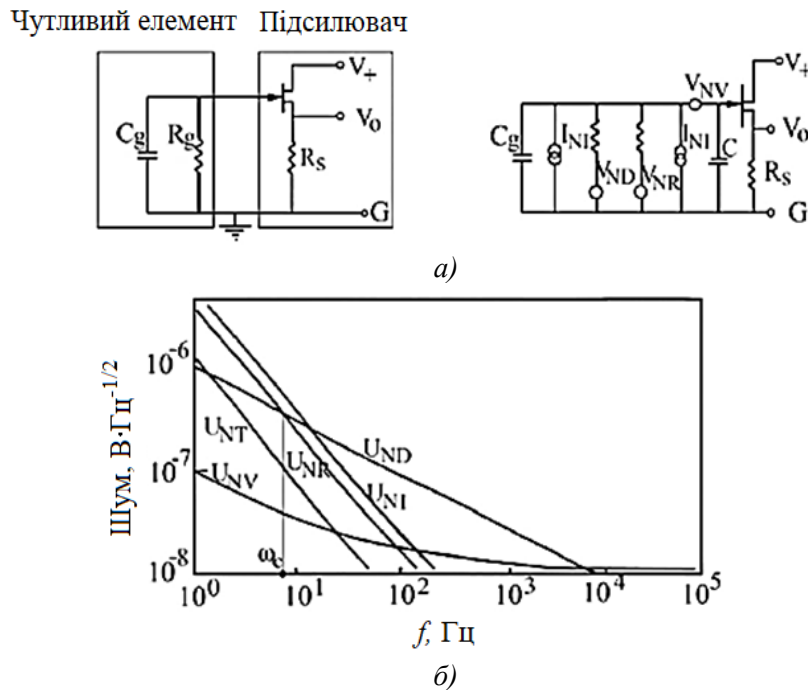


Рисунок 2 – Еквівалентна електрична схема піроелектричного приймача із зазначенням джерел шумів (а) та відносні величини напруг шумів для типових піроелектричних детекторів (б)

При понад 20 Гц переважають джонсонівські теплові шуми опору діелектричних втрат, температурний шум незначний. При частотах  $f < 20$  Гц основний внесок дають джонсонівські шуми опору і шуми підсилювача.

**Висновки.** Крім перелічених вище, є низка інших джерел небажаних сигналів у піроелектричних детекторах, які пов'язані, переважно, зі своїм оточенням – швидкою зміною навколишньої температури, електромагнітними перешкодами, механічними вібраціями. Оскільки всі піроелектрики є одночасно і п'єзоелектриками, то вібрації та акустичні дії генеруватимуть у них паразитні п'єзоелектричні сигнали. Величина цих сигналів значною мірою залежить від матеріалу піроелектрика, способу закріплення чутливого елемента, робочого зрізу піроелектричної пластинки. Ефективним способом зменшення п'єзосигналу, спричиненого акустичним впливом, є вакуумування піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Для боротьби з п'єзоелектричними перешкодами використовують різні компенсаційні методи, які засновані на обробці електричних сигналів від двох п'єзоелементів, один з яких є чутливий елемент піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Обидва елементи знаходяться по можливості в ідентичних механічних станах і електрично включені в протифазі так, що результуючий сигнал містить тільки значно подавлену п'єзоелектричну компоненту.

Для зменшення впливу різних джерел шумів ефективним є застосування різних алгоритмів оброблення вхідних сигналів піроелектричних приймачів теплового випромінювання. Серед основних варто виділити наступні методи підвищення завадостійкості піроелектричних приймачів: диференціальний метод; метод частотної фільтрації; метод спектральної фільтрації;

двохдіапазонний метод; метод оптимальної просторово-частотної фільтрації; параметричні методи.

Розвиток електронних пристроїв на основі піроелектричних приймачів випромінювання йде головним чином у напрямі підвищення завадостійкості за рахунок удосконалення оптичних систем, алгоритмів обробки сигналів, широкого застосування методів цифрової обробки сигналів з використанням спеціалізованих мікроконтролерів та процесорів.

#### Інформаційні джерела

1. Поплавко Ю. М. П'єзоелектрики: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Ю. І. Якименко. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 328 с.

2. Мороз С.А., Ткачук А.А., Лишук В.В. Особливості використання піроелектричних приймачів випромінювання для електронних пристроїв технології Smart City. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» 20-22 жовтня 2022 р. С. 47-48.

3. Луньов С.В., Удовицька Ю.А., Хвищун М.В., Мороз С.А., Маслюк В.Т. Технологія одержання чутливого елемента для датчика інфрачервоного випромінювання. Перспективні технології та прилади". Збірник наукових праць. Випуск 14. м. Луцьк, червень 2019 р. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. С. 77–81.

4. Moroz, S.A., Khvyshchun, M.V., Tkachuk, A.A., Lyshuk V.V., Prystupa, S.O. Investigation of Features of Functioning of the Pyroelectric Sensors in Electronic Security Devices. IEEE 12th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT). Pp. 27-32.

5. Мороз С.А., Пташенчук В.В., Мелимука О.Я. Особливості застосування піроприймачів для електронних охоронних пристроїв. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції (29-30 жовтня 2020 р.): збірник тез. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 104 с. С.53-55

6. Мороз С.А., Заблоцький В.Ю., Хвищун М.В., Селепина Й.Р. Аналіз впливу інфрачервоного випромінювання на піроелектричний приймач. Актуальні проблеми фундаментальних наук: матеріали IV Міжнародної наукової конференції – (Луцьк-Світязь, 01-05 червня 2021 р.). Луцьк: Вежа-Друк, 2021. С. 85-87

**Moroz S.A., Chalyy V.D., Lyshuk V.V., Tkachuk A.A., Goraychuk A.A.**  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

#### ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE SENSITIVITY OF PYROELECTRIC HEAT RADIATION RECEIVERS IN MOTION TRANSMITTERS

*The article analyzes one of the types of transmitters used in Smart City technologies. In particular, sensors based on pyroelectric receivers that register thermal radiation, in particular the radiation of the human body, are considered. It has been established that a number of characteristics are used to assess the efficiency of radiation receivers, the most important of which are sensitivity and sensitivity threshold. Mathematical relations are presented that describe the sensitivity of the receiver as a complex frequency characteristic that connects the reaction of the pyroelectric receiver and the influence on it in the form of a harmonic flow. The characteristics of the sensitivity threshold of the receiver and the formulas for determining this characteristic are presented. It was established that in order to determine the sensitivity threshold of pyroelectric thermal radiation receivers, it is necessary to know the noise level of its sensitive element. To derive the corresponding formulas, an equivalent circuit of a pyroelectric receiver is presented. Sources of noise of pyroelectric elements are established, in particular, thermal (Johnson) noise of the load resistance, thermal (Johnson) noise of the dielectric loss resistance of the sensitive element, noise EMF of the measuring circuit, single noise current of the measuring circuit, temperature noise of the sensitive element. The graphical dependence of the amount of noise from various sources for a typical detector with electrical and thermal time constants is given. Appropriate conclusions were drawn based on the results of the analysis.*

**Key words:** pyroelectric receiver, thermal radiation, sensor, sensitivity, interference noise.