

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-54-31>

УДК 621.317

Мороз Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Лишук Віктор Васильович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8467>

Чалий Василь Дмитрович, магістрант

<https://orcid.org/0000-0002-6592-6715>

Горайчук Андрій Андрійович, магістрант

Тарарай Дмитро Миколайович, студент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ДАВАЧА ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Мороз С.А., Лишук В.В., Чалий В.Д., Горайчук А.А., Тарарай Д.М. Аналіз формування вихідного сигналу давача інфрачервоного випромінювання. В статті проведений аналіз особливостей використання піроелектричних давачів розглянуто суть піроелектричного ефекту, наведені принципи формування теплового випромінювання в зоні виявлення давача, досліджено процес формування вихідного сигналу при дії теплової енергії на давач. Наведені відповідні графіки вихідного сигналу давача. Зроблені відповідні висновки за результатами аналізу.

Ключові слова: чутливий елемент, піроприймач, давач ІЧ-випромінювання, сигналоутворення, зона чутливості.

Moroz S., Lyshuk V., Chalyi V., Goraychuk A., Tararai D. Analysis of the formation of the output signal of the infrared radiation sensor. The article analyzed the features of using pyroelectric sensors, considered the essence of the pyroelectric effect, stated the principles of the formation of thermal radiation in the detection zone of the sensor, investigated the process of forming the output signal when thermal energy acts on the sensor. The corresponding graphs of the output signal of the encoder are given. Appropriate conclusions were drawn based on the results of the analysis.

Key words: sensitive element, pyroreceiver, IR transmitter, signal generation, sensitivity zone.

Постановка проблеми.

Давачі на основі піроелектричного чутливого елемента широко використовуються для різних потреб людини. Це можуть бути охоронні сигналізації, системи автоматичного ввімкнення освітлення тощо. В основі роботи таких давачів лежить реєстрація інфрачервоного випромінювання (ІЧ) живого тіла за допомогою чутливого елемента. Інфрачервоне випромінювання – це тип електромагнітної хвилі, довжина хвилі якої довша, ніж у видимого світла (0,74 мкм), але коротше, ніж у радіохвиль (1-2 мм). Таке випромінювання неможливо побачити людським оком, але воно має теплову енергію, яку можна задетектувати [1, 2].

Людське тіло має температуру в інтервалі від 31°C до 42°C, яка залежить від теплообміну між шкірою та навколишнім середовищем. Воно є джерелом переважно ІЧ випромінювання в діапазоні хвиль довжиною від 4 до 50 мкм. При цьому щільність випромінювання шкіри тіла людини становить: із довжиною хвилі до 5 мкм – до 1%; з довжиною хвилі від 5 до 9 мкм – 20%; з довжиною хвилі від 9 до 16 мкм – 30%; з довжиною хвилі понад 16 мкм – понад 41% (рисунок 1). Людське тіло випромінює інфрачервону енергію з піковою довжиною хвилі від 9 мкм до 10 мкм. Крім того, пікова довжина хвилі інфрачервоних променів, що випускаються об'єктом, що нагрівається, стає коротше в міру підвищення температури [3, 4].

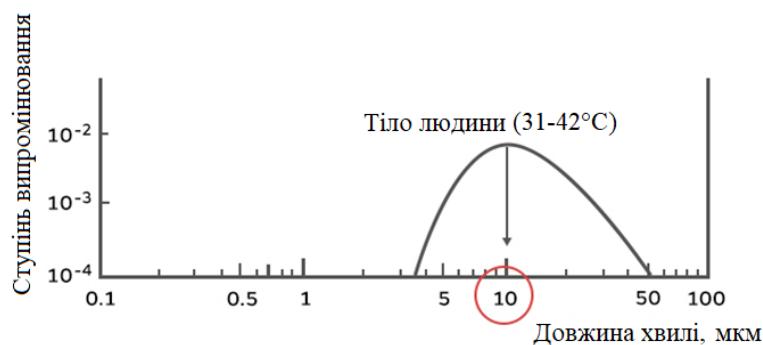


Рис. 1 – Розподіл випромінювання тіла людини по довжині хвилі

Для розуміння можливостей використання піроелектричних датчиків для конкретних випадків потрібно знати суть піроелектричного ефекту, принципи формування теплових потоків в зоні виявлення та як формується вихідний сигнал при дії теплової енергії на датчик.

Аналіз останніх публікацій та мета дослідження

Принцип роботи чутливого елемента датчика полягає в тому, що для деяких кристалічних матеріалів характерною є властивість поляризуватися під впливом ІЧ випромінювання. Разом зі зміною інтенсивності випромінювання здійснюється поляризація і, як наслідок, створюється дипольний момент в кристалі з матеріалів, які називають піроелектриками [5-7]. Детектуючи різницю потенціалів, що утворюються в результаті поляризації між різними областями кристалу піроелектрика можна спостерігати величину теплового ІЧ випромінювання (рисунок 2).

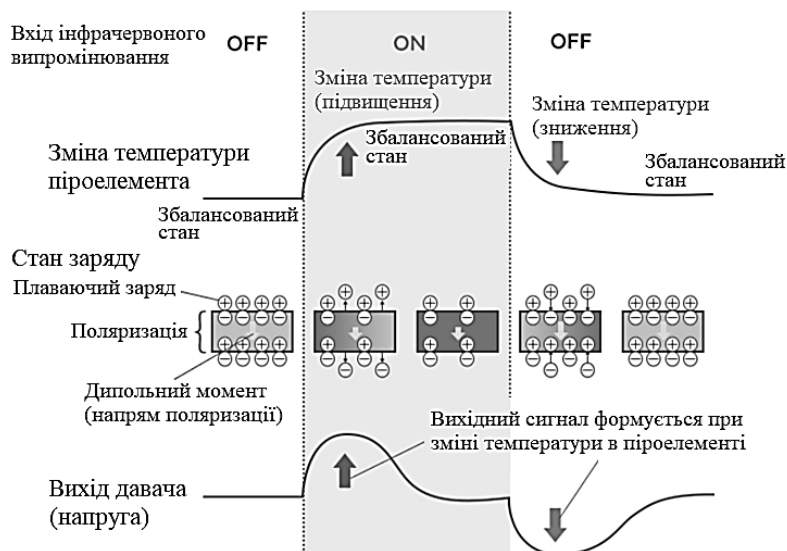


Рис. 2 – Явище піроелектричного ефекту

Принцип дії ІЧ датчиків полягає в реєстрації теплових сигналів, які випромінюються об'єктами в зоні дії датчика. Корисний сигнал на виході одноплощинного піроприймача, в залежності від випромінювання визначається формулою (1):

$$S(t) = S_U \Delta Q(t), \tag{1}$$

де S_U – чутливість по напрузі приймача випромінювання; $\Delta Q(t)$ – зміна величини теплового потоку, що потрапляє у вхідний отвір оптичної системи та виникає у разі руху об'єкта в зоні дії датчика.

Максимальне значення $\Delta Q(t)$ виникає у випадку, якщо об'єкт повністю потрапляє у зону виявлення ІЧ датчика. Прийmemo це значення як ΔQ .

Розглянемо варіант, якщо втрати в оптичній системі досить малі, тому ними можна знехтувати. Визначимо ΔQ через параметри об'єкта та фону навколишнього середовища. Припустимо, що у межах фону (абсолютна температура поверхні якого T_ϕ і випромінювальна здатність E_ϕ), з'являється об'єкт з абсолютною температурою $T_{об}$ та випромінювальною здатністю $E_{об}$. Площу проекції об'єкта на площину, яка перпендикулярна до напрямку випромінювання, позначимо $S_{об}$, а площу проекції фону в полі зору позначимо S_ϕ . Для такого випадку величина теплового потоку, яка потрапляє на вхідний отвір оптичної системи до появи об'єкта спостереження, визначається формулою (2):

$$Q_\phi = L_\phi \frac{S_\phi S_{вх}}{l_\phi^2}, \tag{2}$$

де l_ϕ – відстань від вхідного отвору до фонові поверхні; L_ϕ – яскравість фону; $S_{вх}$ - площа вхідного отвору оптичної системи.

Величина теплового потоку, який створюється об'єктом спостереження, визначається формулою (3):

$$Q_{об} = L_{об} \frac{S_{об} S_{вх}}{l^2}, \tag{3}$$

де l – відстань від датчика до об'єкта спостереження; $L_{об}$ - яскравість об'єкту спостереження.

За наявності об'єкта спостереження сумарний тепловий потік, який потрапляє у вхідний отвір, що створюється об'єктом та окремою частиною не екранованої об'єктом фонові поверхні

визначається за формулою (4):

$$Q_{\Sigma} = L_{\Phi} \frac{S_{\Phi} S_{\text{вх}}}{l_{\Phi}^2} + L_{\text{об}} \frac{S_{\text{об}} S_{\text{вх}}}{l^2} = L_{\Phi} \frac{S_{\text{вх}}}{l_{\Phi}^2} \left(S_{\Phi} - \frac{S_{\text{об}}}{l^2} l_{\Phi}^2 \right) + L_{\text{об}} \frac{S_{\text{об}} S_{\text{вх}}}{l^2}. \quad (4)$$

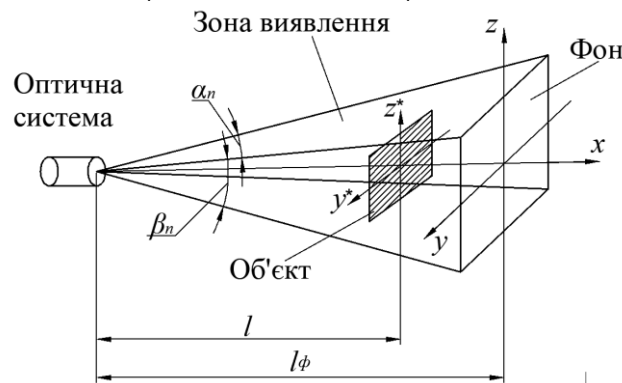


Рис. 3 – Схема зони виявлення інфрачервоного піроелектричного давача

Тоді зміна випромінювання теплового потоку ΔQ визначається за формулою (5):

$$\Delta Q = \frac{S_{\text{вх}} S_{\text{об}}}{l^2} (L_{\text{об}} - L_{\Phi}). \quad (5)$$

Прийmemo твердження, що для об'єкту спостереження та фону виконується закон Ламберта, тому визначимо яскравості $L_{\text{об}}$ та L_{Φ} через випромінювальні здатності та абсолютні температури:

$$L_{\Phi} = \frac{\delta_0 E_{\Phi} T_{\Phi}^4}{\pi}, \quad L_{\text{об}} = \frac{\delta_0 E_{\text{об}} T_{\text{об}}^4}{\pi}, \quad (6)$$

де $\delta_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постійна Стефана-Больцмана

Підставимо формулу (6) у формулу (5) та отримаємо вираз для ΔQ з врахуванням абсолютної температури і випромінювальної здатності об'єкта спостереження і фону:

$$\Delta Q = \frac{\delta_0 S_{\text{вх}} S_{\text{об}}}{\pi l^2} [E_{\text{об}} T_{\text{об}}^4 - E_{\Phi} T_{\Phi}^4] = \Delta E S_{\text{вх}}. \quad (7)$$

При заданих параметрах оптичної системи та приймача випромінювання значення сигналу повністю визначається зміною опроміненості чутливого елемента.

Відомо [3, 4], що випромінювальна здатність шкіри людини дуже висока та становить в середньому 0,99 відносно абсолютно чорного тіла на довжинах хвиль більше 4 мкм. В ІЧ області спектра оптичні властивості випромінювання шкірного покриву досить близькі до характеристик випромінювання чорного тіла. Температура шкіри залежить від теплообміну між шкірою та навколишнім середовищем. Так, при температурі повітря $+25^{\circ}\text{C}$ температура на поверхні долоні людини змінюється в межах $+32...+34^{\circ}\text{C}$, а при температурі повітря $+19^{\circ}\text{C}$ – змінюється в межах $+28...+30^{\circ}\text{C}$. Присутність одягу зменшує теплове випромінювання об'єкта, тому що температура одягу нижча, ніж температура оголеної шкіри. Якщо температура навколо об'єкту $+25^{\circ}\text{C}$ то середня температура поверхні тіла одягненої людини становить приблизно $+26^{\circ}\text{C}$.

Інші параметри, що входять у формулу (7), можуть набувати різних значень які залежать від конкретної обстановки та/або вхідних даних.

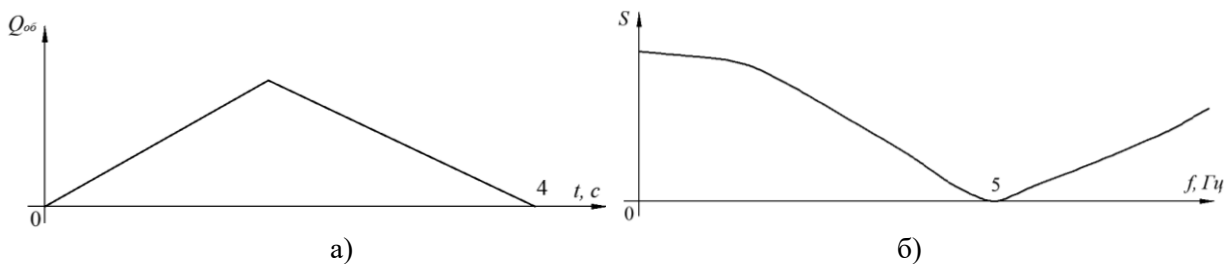
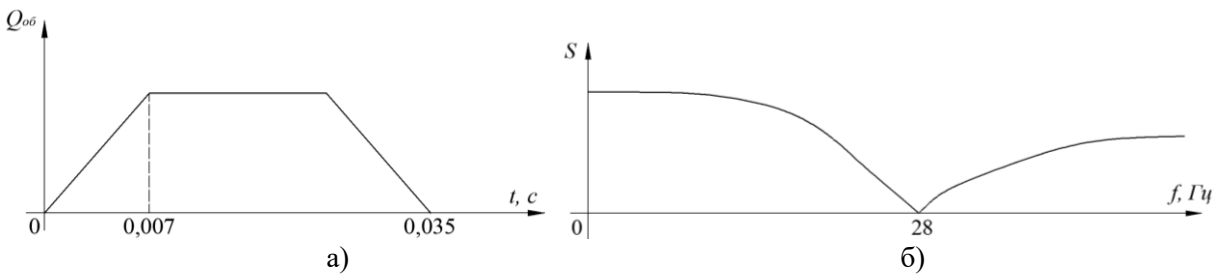
Виклад основного матеріалу дослідження.

Проаналізуємо процес сигналоутворення для давача, основні види завад та сторонніх впливів, які викликають хибне спрацювання ІЧ давача.

Сигналоутворення. Для кращого розуміння методів і алгоритмів підвищення завадостійкості ІЧ давача необхідно знати основні параметри сигналу – амплітуду, форму, тривалість ΔE , залежність від швидкості переміщення людини та температури фону

$$\Delta E = \frac{\delta_0 S_{\text{об}}}{\pi l^2} [E_{\text{об}} T_{\text{об}}^4 - E_{\Phi} T_{\Phi}^4]. \quad (7)$$

Розглянемо, для прикладу, одну зону виявлення довжина якої 10 м, а діаметр променя на основі конуса 0,3 м. Прийmemo, що людина перетинає зону за нормаллю до неї з різними швидкостями (V_{max} , V_{min}) на відстані від приймача 10, 5 та 1 м. Форма сигналу у випадку перетину променя на відстані 10 м має трикутноподібний вигляд з максимумом при повному перекритті зони виявлення (рисунок 4,а). На рисунку 4,б показаний спектр цього сигналу. Якщо перетин променя відбувся на меншій відстані сигнал набуває трапецієподібної форми з крутими фронтами (рисунок 5,а) і спектр цього сигналу набуває вигляду, який показаний на рисунку 5,б.

Рис. 4 – Форма та спектр сигналу на вході піроелектричного давача за умови D_{max} , V_{min} Рис. 5 – Форма та спектр сигналу на вході піроелектричного давача за умови D_{min} , V_{max}

Встановлено, що тривалість вихідного сигналу обернено пропорційна швидкості руху об'єкта і відстані до давача.

Реальний вихідний сигнал відрізняється від ідеального за рахунок різних спотворень, які вносяться трактом підсилення та впливом хаотичних шумів, що створюються різними температурними флуктуаціями фону. Записи реальних сигналів, отримані з використанням пасивного ІЧ сповіщувача наведено на рисунку 6. Також на рисунку подані його спектральні характеристики, які отримані за допомогою спектроаналізатора.

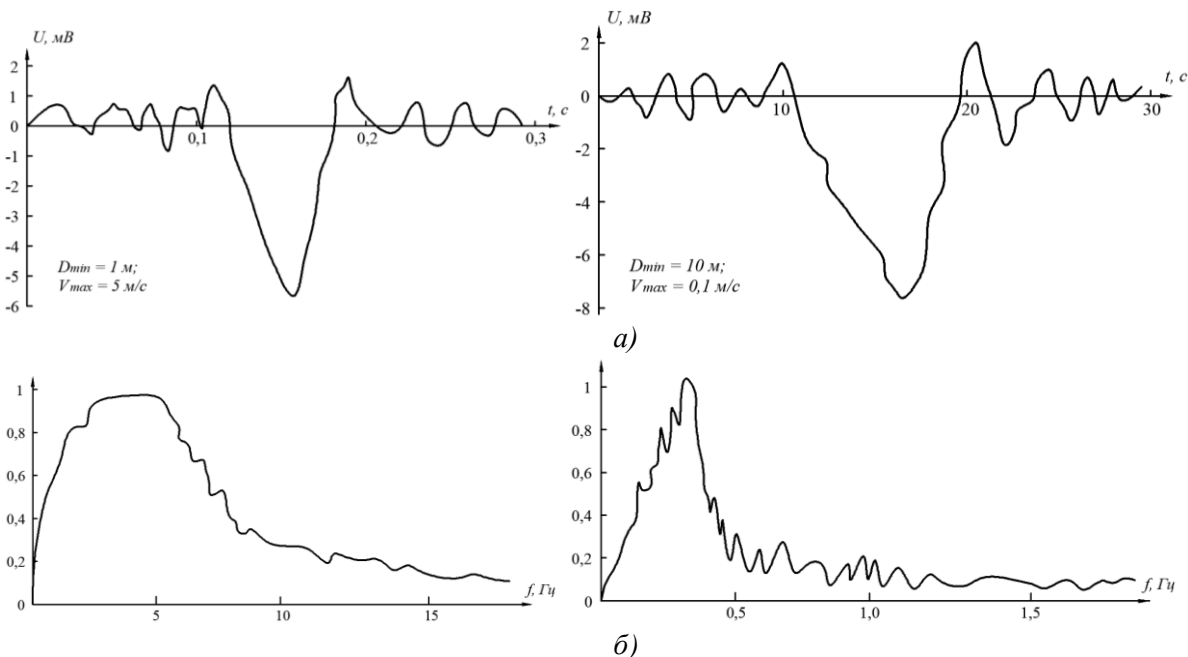


Рис. 6 – Графіки зміни сигналу на виході піроелектричного давача (а) та спектрограми сигналів (б)

Аналізом графіків встановлено спектральне «вікно», яке необхідне для пропускання сигналів, що утворюються при перетині зони виявлення будь-де у всьому діапазоні швидкостей об'єкту від 0,1 до 15 Гц. На краях діапазону присутня можливість ослаблення сигналу, оскільки піроприймач має АЧХ зі спадом в області 5...10 Гц. Для його компенсації потрібне введення в тракт обробки сигналу підсилювача, який забезпечує підйом АЧХ в області 5...20 Гц.

Температурний контраст. Зазвичай, амплітуда вихідного сигналу визначається

температурним контрастом між тілом людини та фоном, на який спрямований промінь виявлення. Оскільки температура фону змінюється зі зміною температури у приміщенні, то змінюється і вихідний сигнал, який пропорційний їх різниці.

У точці, де температура людини і фону співпадають, значення вихідного сигналу дорівнює нулю. В області вищих температур сигнал змінює знак. Температура фону в приміщенні відображає температурний стан повітря поза приміщенням із деяким запізненням, що обумовлено тепловою інерцією матеріалів стін та способом утеплення будівлі.

Температурний контраст, в цілому, залежить від температури зовнішньої поверхні людини, на що впливає переважно одяг. Причому необхідно врахувати, якщо людина входить у приміщення, де встановлено ПЧ давач руху, наприклад, з холодної вулиці, то в перший момент тепловий контраст є досить значним. Поступово, у міру «адаптації» температури одягу до температури приміщення сигнал суттєво зменшується. Проте навіть після тривалого перебування у приміщенні величина вхідного сигналу залежить від виду одягу. На рисунку 7 наведено експериментальні залежності температурного контрасту людини від температури навколо об'єкта. Штриховою лінією показано екстраполяцію експериментальних даних для температури вище $+40^{\circ}\text{C}$.

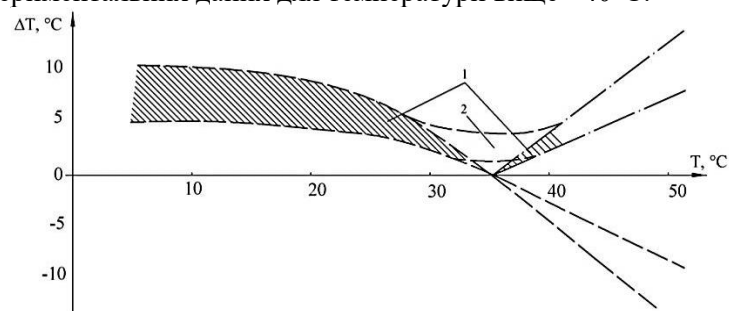


Рис. 7 – Залежність температурного контрасту людини від температури навколишнього середовища

Заштрихована область 1 – це діапазон контрастів залежно від форми одягу, типу фону, розмірів людини та швидкості його руху. Варто відзначити, що перехід величини температурного контрасту через нуль відбувався тільки в тому випадку, якщо в області температур $30 \dots 39,5^{\circ}\text{C}$ вимірювання проводилися після адаптації об'єкта в нагрітому приміщенні протягом 15 хв. У разі ж вторгнення об'єкта що знаходився до цього в приміщенні з температурою нижче 30°C або на відкритому повітрі з температурою 44°C , в зону чутливості давача, рівні сигналів в діапазоні температур $30 \dots 39,5^{\circ}\text{C}$ лежать в області 2 і не досягають нульового значення.

Розподіл температури на поверхні людини не рівномірний. Найбільш близька вона до 36°C на відкритих частинах тіла - лиці та руках, а температура поверхні одягу ближче до фону приміщення. Тому сигнал на вході піроприймача залежить від того, якою частиною тіла перекривається променева зона чутливості.

Проаналізуємо вплив завад, що викликають хибне спрацювання пасивних ПЧ давачів. Це такі впливи зовнішнього середовища або внутрішні шуми приймального пристрою давача, які не пов'язані з рухом об'єкта в зоні чутливості.

Існує наступна класифікація перешкод:

- теплові, які зумовлені нагріванням фону приміщення при дії на нього сонячного випромінювання, конвекційних потоків повітря від роботи радіаторів, кондиціонерів, протягів тощо;
- електричні, що викликаються наведеннями від джерел електро- та радіовипромінювань на окремі елементи електронної частини ПЧ давача;
- власні, які обумовлені шумами піроприймача та тракту підсилення вхідного сигналу;
- сторонні, які пов'язані з переміщенням у зоні чутливості ПЧ давача дрібних тварин або комах по поверхні вхідного оптичного вікна.

Висновки. У результаті аналізу процесу утворення вихідного сигналу встановлено, що амплітуда сигналу визначається температурним контрастом поверхні об'єкта виявлення та навколишнього фону, який може становити від частини градуса до десятків градусів; форма сигналу має трикутноподібний або трапецеїдальний вигляд, тривалість сигналу встановлюється місцем перетину зони виявлення і при русі нормалі до променя може становити від 0,05 до 10 с. Під час

руху під кутом до нормалі тривалість вихідного сигналу збільшується. Максимум спектральної густини вихідного сигналу знаходиться в інтервалі від 0,15 до 5 Гц; при русі людини вздовж променя сигнал мінімальний і визначається лише різницею температур окремих ділянок поверхні людини та становить величину менше 1°C; під час руху об'єкту між променями сигнал практично відсутній; при температурі в приміщенні, яка близька температурі поверхні тіла людини, сигнал мінімальний, тобто. різницю температур становить менше 1°C; амплітуди сигналів у різних променях зони виявлення можуть суттєво відрізнитись один від одного, оскільки визначаються температурним контрастом тіла людини та ділянкою фону, на який спрямований даний промінь. Різниця може досягати менше 10°C.

Спектральний діапазон завад охоплює діапазон сигналу і лежить у області від одного до десятків герц. Найнебезпечнішим типом завад є сонячне світло фону, ефект якого підвищує температуру фону на 3-5°C. Вплив від сонячного світла для близьких ділянок фону жорстко корелює між собою і може бути ослаблений при використанні двохпроменевої схеми побудови засобів виявлення. Конвективні завади від теплових побутових пристроїв мають вигляд флуктуаційних випадкових коливань температури, які досягають 2-3°C в діапазоні частот від 1 до 20 Гц зі слабкою кореляцією між променями.

Електричні завади мають форму коротких імпульсів або ступінчастих функцій із крутою передньою частиною, наведена напруга може бути в сотні разів вище, ніж вхідний сигнал. Власні шуми піроприймача, що відповідають сигналу, коли температура змінюється на 0,05 ... 0,15 °C, лежить у діапазоні частот, що перекриває діапазон вхідного сигналу, і збільшується пропорційно температурі приблизно половину на кожні 10 °C.

Список бібліографічного опису

1. Електронні елементи та пристрої систем безпеки й охорони: Навчальний посібник / Барило Г.І. та ін.; за заг. ред. Готри З.Ю. Чернівці: Рута, 2017. 216 с.
2. Frankiewicz and R. Cupek, "Smart passive infrared sensor - Hardware platform," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 7543-7547, doi: 10.1109/IECON.2013.6700389.
3. O. Urfaliglu, E. B. Soyer, B. U. Toreyin and A. E. Cetin, "PIR-sensor based human motion event classification," 2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, Aydin, Turkey, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2008.4632611.
4. Луцьков С.В., Удовичка 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.
5. 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
6. 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.
7. Yu Z, Yuan L, Luo W, Feng L, Lv G. Spatio-Temporal Constrained Human Trajectory Generation from the PIR Motion Detector Sensor Network Data: A Geometric Algebra Approach. Sensors. 2016; 16(1):43. <https://doi.org/10.3390/s16010043>.

References

1. Electronic elements and devices of safety and security systems: Training manual / G.I. Barilo. etc.; in general ed. Gotry Z.Yu. Chernivtsi: Ruta, 2017. 216 p.
2. Frankiewicz and R. Cupek, "Smart passive infrared sensor - Hardware platform," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 7543-7547, doi: 10.1109/IECON.2013.6700389.
3. O. Urfaliglu, E. B. Soyer, B. U. Toreyin and A. E. Cetin, "PIR-sensor based human motion event classification," 2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference, Aydin, Turkey, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2008.4632611.
4. Lunyov S.V., Udovytka Yu.A., Khvishtun M.V., Moroz S.A., Maslyuk V.T. The technology of obtaining a sensitive element for an infrared radiation sensor // "Promising technologies and devices". Collection of scientific works. Issue 14. Lutsk, June 2019 - Lutsk: Lutsk National Technical University, 2019. - pp. 77–81.
5. 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
6. Moroz S.A., Tkachuk A.A., Lyshuk V.V. Peculiarities of using pyroelectric radiation receivers for electronic devices of Smart City technology. Materials of the 5th All-Ukrainian scientific and practical conference "Instrumentation and metrology: modern problems, development trends" October 20-22, 2022 p. 47-48.
7. Yu Z, Yuan L, Luo W, Feng L, Lv G. Spatio-Temporal Constrained Human Trajectory Generation from the PIR Motion Detector Sensor Network Data: A Geometric Algebra Approach. Sensors. 2016; 16(1):43. <https://doi.org/10.3390/s16010043>