

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІРОЕЛЕКТРИЧНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ

© Головацький Р.І., 2009

Запропоновано математичну модель піроелектричного сенсора, що адаптована для використання під час розроблення та моделювання детекторів руху для вбудованих систем. Розглянуто основні фази перетворення інфрачервоного випромінювання, що поглинається інтегрованим сенсором, на електричний сигнал.

Ключові слова – піроелектричний сенсор, детектор руху, модель

In this paper the mathematical model of a pyroelectric sensor control adapted for usage is offered at development and simulation of motion detectors for the embedded systems. Master phases of caloric radiation conversion which is swallowed by a embedded sensor, in an electrical signal surveyed.

Keywords – pyroelectric sensor, motion detector, model

Вступ

Сьогодні дуже широко використовуються різні охоронні системи. У таких системах чи не основне місце займають детектори руху [1]. Сучасні детектори руху працюють за різними фізичними принципами, але найперспективнішими є детектори, що фіксують і обробляють теплове випромінювання [2]. Звичайно, достатньо велика кількість хибних спрацьовувань та неможливість чітко ідентифікувати джерело сигналу (завада це чи корисний сигнал) свідчить про те, що такі детектори є далекими від ідеалу. Широкі можливості для покращання ситуації надає інтеграція детекторів руху в інтелектуальну вбудовану систему [3]. Для виконання такої інтеграції просто необхідним є адекватний математичний апарат з точними математичними моделями. Тому розроблення та вдосконалення математичного забезпечення для таких задач є актуальними.

Фази перетворення інфрачервоного випромінювання на електричний сигнал

Під час перетворення вхідного інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал в піроелектричному сенсорі можна виділити три основні фази. Під час першої фази перетворення інфрачервоне випромінювання попадає на піроелектричний елемент через вхідне вікно або інфрачервоний (ІЧ) фільтр з коефіцієнтом передачі tF . Потік випромінювання ΦS поглинається і стає причиною зміни температури ΔT_P в піроелектричному елементі. Під час другої фази відбувається термоелектричне перетворення, при якому в наслідок піроелектричного ефекту у кристалі піроелектрика зміна температури ΔT_P приводить до зміни концентрації зарядів на електродах сенсора. Під час третьої фази перетворення електричний заряд перетворюється в електричний сигнал за допомогою попереднього підсилення сигналу.

На рис. 1 зображені три основні фази перетворення в піроелектричному сенсорі, починаючи від інфрачервоного опромінення вхідного вікна сенсора до отримання електричного сигналу.

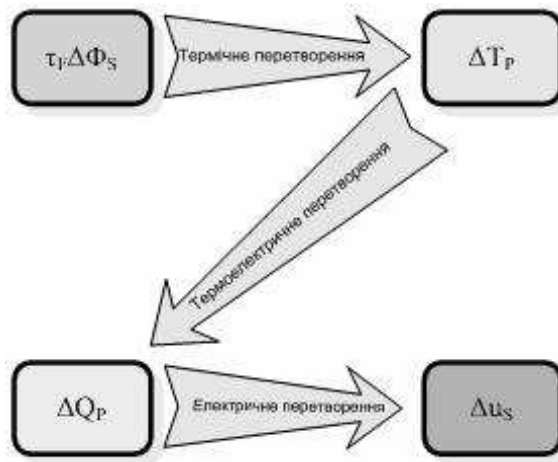


Рис. 1. Фази перетворення теплової енергії в піроелектричних інтегрованих інфрачервоних сенсорах

Теплове перетворення

У піроелектричному сенсорі теплове перетворення є основним для досягнення високої чутливості та високого співвідношення сигнал/шум. Завдяки цьому досягається висока чутливість до зміни температури ΔT_P .

На рис. 2 наведено спрощену теплову модель, а на рис. 3 зображено еквівалентну електричну схему теплового перетворення.

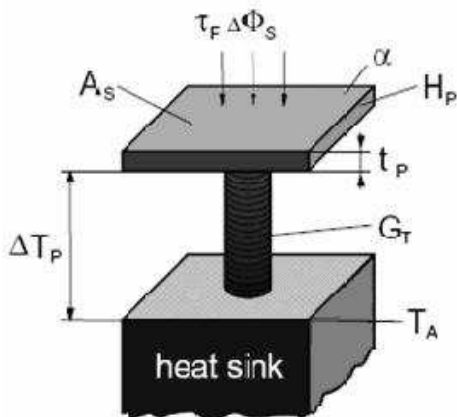


Рис. 2. Спрощена теплова модель

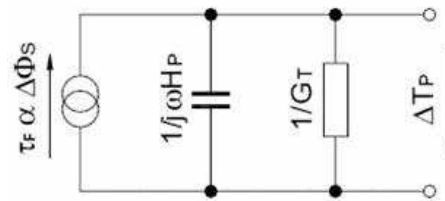


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема

Чутливий до випромінювання елемент охарактеризуємо коефіцієнтом поглинання α , теплоємністю H_P і теплопровідністю G_T в оточенні, яке представлено тепловтратами із заданою температурою T_A .

Для теплової сталої часу запишемо рівняння:

$$\tau_T = \frac{H_P}{G_T} \quad (1)$$

різниця температур:

$$\Delta T_P = \frac{\alpha \tau_F \Phi_S}{\sqrt{G_T^2 + \omega H_P^2}} \quad (2)$$

або для змінного потоку стабільного стану:

$$\Delta \tilde{T}_P = \frac{\alpha \tau_F \tilde{\Phi}_S}{G_T} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_T)^2}} \quad (3)$$

Термоелектричне перетворення

Термоелектричне перетворення є наслідком піроелектричного ефекту і пропорційно температурному коефіцієнту та площі поверхні детектора, тому запишемо рівняння [4]:

$$i_p = pA_S \frac{\Delta T_p}{dt} \quad (4)$$

Для синусоїдально - модульованого потоку випромінювання середньоквадратичне значення піроелектричного струму короткого замикання i_p , згідно із рівнянням (3), буде таким:

$$\tilde{i}_p = \bar{\omega} p A_S \frac{\alpha \tau_F \tilde{\Phi}_S}{G_T} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_T)^2}} \quad (5)$$

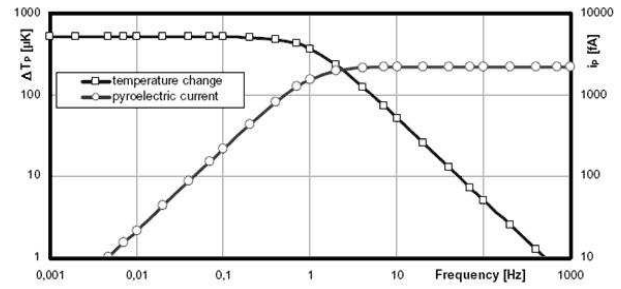


Рис.4. Частотна залежність зміни температури та струму короткого замикання піроелектричного елемента

Прийнявши $\tau_F = \alpha = 1$, $G_T = 1.95 \text{ mW/K}$, $HP = 310 \text{ μWs/K}$, $\tau_T = 159 \text{ ms}$, $t_p = 25 \text{ μm}$, $AS = 4 \text{ mm}^2$, $CP = 3.1 \text{ J/cm}^3/\text{K}$, $p = 17 \text{ nC/cm}^2/\text{K}$, можемо обчислити частотну залежність зміни температури та струму короткого замикання типового піроелектричного детектора від падаючого потоку випромінювання потужністю $\Phi_S = 1 \text{ μW}$ (рис. 4).

Залежність частоти від зміни температури представляється типовими низькочастотними характеристиками. Кутова частота f_T описується рівнянням (6):

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_T} \quad (6)$$

Електричне перетворення

Оскільки струм, що надходить з піроелектричного сенсора, є малим, він повинен бути перетворений підсилювачем з високоімпедансним входом. Сьогодні є дві доступні альтернативи: режим підсилення за напругою та режим підсилення за струмом [5].

Напруга сигналу і чутливість для обох режимів може бути визначена відповідно, використовуючи рівносильні рівняння:

$$\tilde{u}_s = \bar{\omega} \alpha \tau_F \tilde{\Phi}_S A_S p \frac{1}{G_T} R \cdot \frac{1}{[1 + (\omega \tau_T)^2]^{1/2}} \cdot \frac{1}{[1 + (\omega \tau_E)^2]^{1/2}} \quad (7)$$

$$R_V = \frac{\tilde{u}_s}{\tilde{\Phi}_S} = \bar{\omega} \alpha \tau_F A_S p \frac{1}{G_T} R \cdot \frac{1}{[1 + (\omega \tau_T)^2]^{1/2}} \cdot \frac{1}{[1 + (\omega \tau_E)^2]^{1/2}} \quad (8)$$

де $R = R_G$

$$\tau_E = RGCP \quad (9)$$

дійсне для режиму напруги і: $R = R_{fb}$

$$\tau_E = RfbCfb \quad (10)$$

для струмового режиму.

Для порівняння частотних залежностей сигналу в обох режимах виконаємо обчислення при таких значеннях: $\Phi_S = 1 \text{ μW}$, ємнісний опір піроелектричного кристала $CP = 63 \text{ pF}$, ємнісний опір зворотного зв'язку $Cfb = 0.68 \text{ pF}$, $RG = Rfb = 24 \text{ G}\Omega$, електрична стала часу $\tau_E = 1.5 \text{ s}$ для режиму напруги і $\tau_E = 16 \text{ ms}$ для режиму струму. Графік залежностей подано на рис.5 з врахуванням результатів, наведених на рис.4.

Джерела шуму піроелектричного кристала і підсилювача зменшують виявляючу здатність піроелектричного сенсора загалом. Як міра для визначення співвідношення сигнал/шум в інфрачервоних детекторах часто використовується питома виявляюча здатність [6], для якої запишемо формулу

$$D^* = \frac{A_s^{1/2} S_V}{\tilde{u}_N} \quad (11)$$

де \tilde{u}_N – напруга густини шуму – ефективна величина шуму, яка обумовлюється смугою пропускання шуму в 1Hz на виході підсилювача.

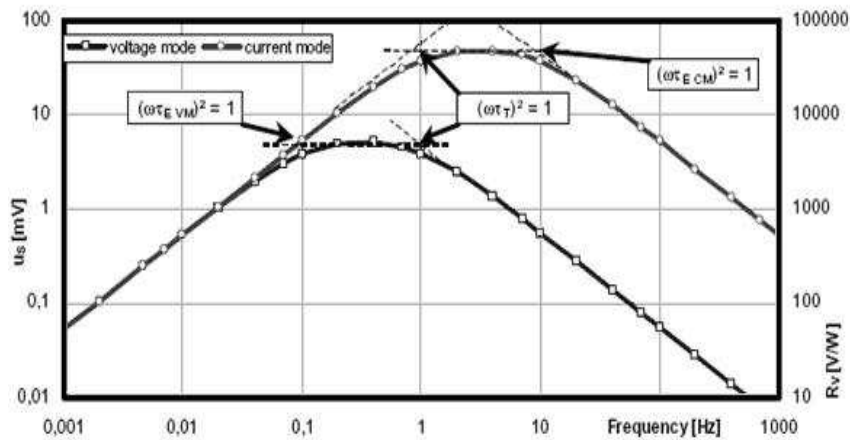


Рис.5. Порівняння частотної залежності напруги сигналу/чутливості для режиму напруги та струмового режиму

В ідеальному піроелектричному детекторі теплообмін, викликаний випромінюванням між піроелектричним кристалом і взаємодією з навколишнім середовищем, виступає як єдине невідворотне джерело шуму. у реальних піроелектричних сенсорах необхідно враховувати й інші джерела шуму. Цей підхід можна використати для моделювання і підвищення чутливості піроелектричних сенсорів, виготовлених за MEMS ідеологією. В одному кристалі можуть бути виготовлені як сенсор, так і схеми перетворення та керування.

Висновки

У статті запропонована математична модель піроелектричного сенсора, що адаптована для використання під час розроблення та моделювання детекторів руху для вбудованих систем. Розглянуто три основні фази перетворення вхідного інфрачервоного випромінювання, від об'єкта детектування на електричний сигнал. Подано спрощену теплову модель та еквівалентну електричну схему теплового перетворення. Обчислено частотну залежність зміни температури та струму короткого замикання типового піроелектричного детектора від падаючого потоку випромінювання з заданою потужністю. Порівняно частотні залежності електричного сигналу з піроелектричного сенсора в обох режимах: режимі підсилення за напругою та режимі підсилення за струмом.

1. Лобур М.В., Головацький Р.І. Методи адаптації чутливості пасивних інфрачервоних детекторів руху до об'єктів спостереження // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" №512, "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". 2. Lobur M.V., Golovatsky R.I. Methods of sensitivity management of passive infrared detectors of movement. CADSM 2005, Lviv – Polyana, UKRAINE. P. 276. 3. Лобур М.В., Головацький Р.І. КМОН інтегрований інфрачервоний детектор руху. Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка" №548, "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика". – Львів, 2008. 4. Кременчугский Л. С., Ройцина О. В. Пироэлектрические приёмные устройства. – К.: Наук. думка, 1982. – 368 с. 5. Microelectronic Engineering / P.K. Larsen, G.J.M. Dormans. Eds. 1995. V. 29. 6. Кременчугский Л. С., Ройцина О. В. Система параметров и характеристик тепловых приёмников излучения / В кн.: Тепловые приёмники излучения. – Л.: ГОИ, 1982.