

УДК 621.382

**РОЗРОБКА В СЕРЕДОВИЩІ MICRO-CAP СИМУЛЯТОРА
ПРОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНИХ
МОДУЛІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

Кудря Т.К., Ключник І.Іг, Бондаренко О.Ю., Ключник І.І.

e-mail: tymur.kudria@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ПЕЕА,
м. Харків, Україна

This work is devoted to the development of a simulation model of a pyroelectric converter in the Micro-Cap 12 software environment in order to study the frequency, time and phase characteristics of pyroelectric detectors. Analysis of the behavior of pyrodetectors under different conditions and from the structural and physical parameters without physical manufacturing of samples is a very relevant task even in our time. This report considers the concept of a pyroelectric converter, its equivalent circuits, the parameters necessary for building a simulator, and also makes a comparison with a ready-made industrial device. The developed simulator can be used in scientific research, the educational process and engineering practice in the creation and improvement of pyroelectric systems.

Завдяки високій чутливості, широкому спектральному діапазону та відсутності необхідності в примусовому охолодженні, піроелектричні перетворювачі є основою для побудови датчиків руху, систем пожежної безпеки, газоаналізаторів, безконтактних пірометрів тощо. Ефективність та надійність пристроїв, побудованих на основі цих перетворювачів, безпосередньо залежить від глибокого розуміння їхніх фізичних властивостей та робочих характеристик, таких як частотна, часова та фазова.

Піроелектричний ефект полягає у виникненні електричного заряду на поверхні кристала при зміні його температури. Величина вихідного струму піродетектора залежить від швидкості зміни температури та піроелектричного коефіцієнту матеріалу.

Динамічні властивості піроелектричних детекторів визначаються тепловими та електричними процесами, які характеризуються тепловою та електричною сталими часу. Саме ці параметри формують частотні та часові характеристики детектора, зокрема його смугу пропускання, швидкодію та рівень шумів. Комп'ютерне моделювання дозволяє не лише відтворювати поведінку реальних пристроїв, але й проводити всебічний аналіз їх роботи при зміні різноманітних параметрів у віртуальному середовищі [1, 2].

Існує декілька електричних схем заміщення піроелектричних детекторів. Для моделювання використано електротеплову аналогію, за якою теплові процеси замінюються еквівалентними електричними елементами. Обрана схема заміщення [2] враховує всі важливі складові

піродетектора і тому складається з каскадів, що відповідають вхідному тепловому узгодженню, фільтру верхніх частот, що визначається тепловою сталою часу τ_T ; фільтру нижніх частот, що визначається електричною постійною часу τ_E та узгоджувального вихідного каскаду. Вигляд багатокаскадної еквівалентної схеми піроелектричного перетворювача для моделювання роботи піродетектора в симуляторах кіл наведено на рис. 1.

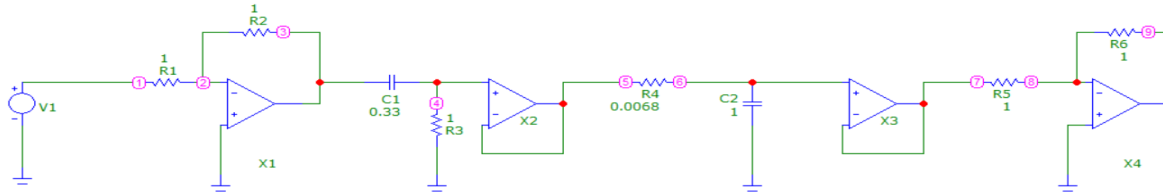


Рисунок 1 – Багатокаскадна еквівалентна схема заміщення піроелектричного перетворювача для моделювання роботи піродетектора в симуляторах кіл

Для реалізації поставленої мети було обрано програмний пакет Micro-Cap 12. Підґрунтям для вибору стали його широкі можливості щодо поведінкового моделювання, наявність потужних інструментів частотного та часового аналізу, а також доступність повної професійної версії на безоплатній основі.

На базі розробленої схеми (рис. 1) було проведено серію моделювальних експериментів для дослідження основних характеристик піродетектора. Аналіз частотних характеристик показав, що АЧХ піроелектричного перетворювача має яскраво виражений смуговий характер. Нижня частота зрізу визначається виключно тепловою сталою часу τ_T . Збільшення теплового опору R_T призводить до розширення смуги пропускання в область низьких частот. Верхня частота зрізу визначається електричною постійною часу τ_E . Збільшення електричної ємності C_E призводить до розширення смуги пропускання в область високих частот.

Дослідження реакції на одиничний імпульс теплового потоку дозволило оцінити швидкодію детектора. Виявлено, що фронт наростання сигналу визначається електричною постійною часу, тоді як спад сигналу залежить від теплової постійної часу.

Встановлено, що збільшення величини опору резистора R_2 , який фактично визначається піроелектричним коефіцієнтом матеріалу γ , на схемі заміщення піроелектричного перетворювача призводить до пропорційного збільшення амплітуди вихідної напруги у всьому частотному діапазоні.

Аналіз характеристик піродетектора з використанням схеми узгодження на операційному підсилювачі показав дещо більший вихідний сигнал, порівняно з вихідним каскадом на транзисторі. Використання додаткових каскадів підсилення призводить до фазових спотворень та зміни у верхній границі частотного діапазону.

Моделювання двохелементного піроелектричного перетворювача показало, що два послідовно з'єднані піроелектричні елементи з протилежною полярністю компенсують заряди, що генеруються коливаннями фонові температури, та подвоює кількість різних команд, які можуть бути передані рухом об'єкта та розпізнані за допомогою піроелектричного перетворювача.

Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання з експериментальними даними реального піроелектричного детектора LNi 874 [1]. Встановлено, що створена модель показала високу якісну та кількісну узгодженість, адекватно відтворює основні динамічні характеристики ПЕП, а відхилення не перевищують допустимих інженерних похибок. Результати симуляції наведені на рис.2.

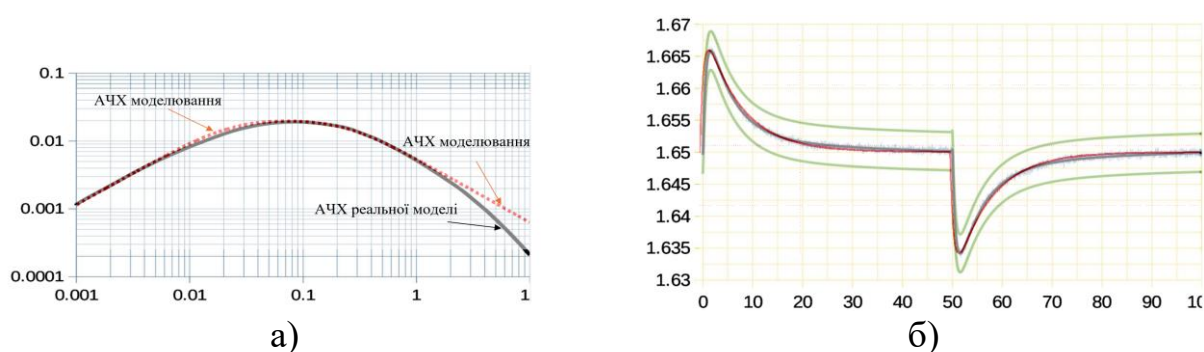


Рисунок 2 – Порівняння амплітудно частотних характеристик (а) та часових характеристик (б) реальної та імітаційної моделі піроелектричного перетворювача LNi 874

Отже, порівняння теоретичних та практичних результатів, отриманих в роботі, дає можливість стверджувати, що розроблена модель коректно відтворює часові та частотні характеристики піроелектричного перетворювача, та показує закономірний вплив його теплових та електричних параметрів на форму, амплітуду, швидкодію та фазові властивості вихідного сигналу. Модель може бути використана як ефективний інструмент для дослідження, оптимізації та проєктування піроелектричних детекторів та інформаційно вимірювальних модулів на їх основі.

Список використаних джерел:

1. Odon A., Szlachta A. Voltage response of a pyroelectric detector, *Sensors*. № 22. 2022. P. 1–14. doi: <https://doi.org/10.3390/s22166265>.
2. Klyuchnyk I., Bondarenko O., Kliuchnyk I., Degtiarov O., Galkin P. A multistage equivalent circuit for modeling pyroelectric transducers, *Ukrainian Metrological Journal*. № 1. 2026. P. 18–26. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2026.355690> 2026.