

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

ГЮИК 464425.001 ПЗ  
(позначення документа)

"Розробка в Workbench симулятора піродетектора та аналіз його  
характеристик"  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 курсу, групи РЕАЗм-21-1

Олійник В.К.  
(прізвище, ініціали)

спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби  
(повна назва спеціалізації)

Керівник проф. Хорошайло Ю.Є.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПЕЕА \_\_\_\_\_  
(підпис)

Хорошайло Ю.Є.  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

Освітньо-кваліфікаційний рівень Другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Радіоелектронні апарати та засоби

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПЕЕА

Хорошайло Ю.Є.

“      ”        2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачу

Олійнику Владиславу Костянтиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка в Workbench симулятора піродетектора та аналіз його характеристик

затверджені наказом по університету від 14.11.2022 р. № 1475 Ст.

2. Термін подання здобувачем роботи 02.12.2022

3. Вихідні дані до роботи піродетектори  
компанії Eltec Instruments

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Вступ

4.2 Аналіз ринку піродетекторів та їх застосувань;

4.3 Теоретичні основи піродетекторів

4.4 Розрахунок чутливостей для піродетекторів

4.5 Висновки

4.6 Перелік посилань

4.8 Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал  
представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt)

6. Консультанти розділів роботи

Найменування Розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2022	
2	Аналіз завдання	02.09.2022	
3	Огляд літератури з теми дослідження	06.09.2022	
4	Проведення експериментів	25.09.2022	
5	Розрахунки	30.10.2022	
6	Оформлення пояснювальної записки	15.11.2022	
7	Подання атестаційної роботи в ЕК	02.12.2022	

Дата видачі завдання 01.09.2022

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олійник В.К.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Хорошайло Ю.Є.  
(посада, прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

### РОЗРОБКА В WORKBENCH СИМУЛЯТОРА ПІРОДЕТЕКТОРА ТА АНАЛІЗ ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК

Пояснювальна записка 85 с., 33 рис., 24 таблиці, 39 джерел за списком посилань.

СИМУЛЯТОР, ПІРОДЕТЕКТОР, АЛГОРИТМ, ЧИСЛОВІ ЗНАЧЕННЯ,  
ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ХАРАКТЕРИСТИКА.

Метою роботи є дослідження властивостей деяких піродетекторів одного із ведучих виробників, компанії Eltec Instruments, Inc. (США), як найбільше документованою серед інших виробників.

Об'єктами дослідження є двадцять моделей піродетекторів вищеназваного виробника. Для кожного піродетектора розроблені алгоритми розрахунків, з метою полегшення сприйняття інформації представлені числові значення, виконані відповідні розрахунки та побудовані графіки кожного піродетектора.

## ABSTRACT

### PYRODETECTOR SIMULATOR DESIGN AND CHARACTERISTIC ANALYSIS IN WORKBENCH

This explanatory note includes pages 85, figures 33, tables 24, references 39.

SIMULATOR, PYRODETECTOR, ALGORITHM, NUMERICAL  
VALUES, CONVERTER, CHARACTERISTICS.

This manuscript aims to disclose the properties for some commercially available pyrodetectors manufactured by Eltec Instruments, Inc. (USA), one of the world's leading companies, as the most informative.

The objects of this research are twenty pyrodetectors of the above mentioned manufacturer. Every calculation is optimized for a particular pyrodetector. Numerical values are given with the aim of simplifying the visual study. All calculations are provided with corresponding charts.

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В даній квалфікаційній роботі використано наступне програмне забезпечення:

- Google Docs (безкоштовне);
- Google Sheets (безкоштовне);
- Google Slides (безкоштовне);
- Electronic Workbench 5.12 (безкоштовне).

## ЗМІСТ

1. АНАЛІЗ РИНКУ ПІРОДЕТЕКТОРІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАНЬ	9
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІРОДЕТЕКТОРІВ	20
2.1 Математичний опис піродетекторів	20
2.2 Засіб вимірювання чутливості піродетекторів	24
2.3 Амплітудно-частотні характеристики існуючих піродетекторів Eltec Instruments, Inc.	25
2.4 Однотипність піродетекторів	29
3. РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТЕЙ ДЛЯ ПІРОДЕТЕКТОРІВ	31
3.1 Теоретичні аспекти	31
3.2 Підготовка чисельних даних та моделювання	32
3.3 Математичний опис піродетекторів	33
3.3.1 Піроелектричний детектор M404	33
3.3.2 Піроелектричний детектор M405	35
3.3.3 Піроелектричний детектор M405M6	37
3.3.4 Піроелектричний детектор M406	39
3.3.5 Піроелектричний детектор M40612	41
3.3.6 Піроелектричний детектор M40623	43
3.3.7 Піроелектричний детектор M406M39	45
3.3.8 Піроелектричний детектор M406MBK	47
3.3.9 Піроелектричний детектор M406MBN	49
3.3.10 Піроелектричний детектор M407	51
3.3.11 Піроелектричний детектор M407M24	53
3.3.12 Піроелектричний детектор M407M56	55
3.3.13 Піроелектричний детектор M429	57
3.3.14 Піроелектричний детектор M441	59
3.3.15 Піроелектричний детектор M442	61
3.3.15 Піроелектричний детектор M446/M446M11	63
3.3.16 Піроелектричний детектор M459	65
3.3.17 Піроелектричний детектор M479	67
3.3.17 Піроелектричний детектор M479M1	69
3.3.18 Піроелектричний детектор M481	71

	8
3.3.19 Піроелектричний детектор M482	73
3.3.20 Піроелектричний детектор M5192	75
ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	82

## 1. АНАЛІЗ РИНКУ ПІРОДЕТЕКТОРІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАНЬ

Перший теоретичний опис піродетектору з'явився в 1962 [1,2]. З цього моменту протягом рівно шістдесяти років суттєвих змін в теорії не відбувалось і основні теоретичні тези копіювались з однієї статті в іншу [3-6], однієї книги в іншу [7-9], однієї дисертації в іншу [10-12], поки в 2022 р. українським дослідником, колишнім випускником аспірантури Харківського національного університету радіоелектроніки кафедри *Проектування та експлуатації електронних апаратів* Олександром Бондаренко не було вперше в світі розкрито повне математичне рівняння піродетектору [13] класичної конструкції “*вільно підвішений у повітрі*” (англ. *air-suspended*) та випробувано на великому ряді зразків [14].

Хоча перші лабораторні зразки піроетекторів були отримані за два з половиною десятиліття до того [15], перше серійне виробництво відкрилось лише у 1975 р. Засновником ринку піродетекторів була американська компанія Eltec Instruments, Inc. Ця компанія постачала на ринок зразки піродетекторів на основі монокристалу танталату літію та низько шумячі високоомні резистори для космічної техніки.

Перші моделі піродетекторів які потрапили на ринок були М40х, а саме 400, 402, 404, 406, 408. М400 представляє собою зразок класичного піродетектору — вільно підвішеного в повітрі. Чутливий елемент, пластина з піроелектричного матеріалу, зокрема танталату літію, встановлена на чотири мініатюрних дуги діаметром приблизно 25 мкм, виконаних із золота, механічно, термічно та електрично з'єднані з чутливим елементом за допомогою спеціального клею [16].

Вся конструкція розміщена в транзисторному корпусі ТО-5. М402 аналогічна М400 за винятком, що існує можливість вибору підключення вбудованого резистору номіналом 2 ГΩ. М404 продовжує лінійку М40х та вже має двохканальний операційний підсилювач підключений до чутливого елементу таким чином, що один з підсилювачів виконує функцію перетворювача імпедансу, а інший — перетворювач *струм-напруга*. Завдяки своїй дуальності М404 є найкращим вибором для науково-дослідницьких робіт та станом на сьогоднішній день до сих пір не має аналогів на ринку. М406 має на борту польовий транзистор у якості перетворювача імпедансу та високоомний резистор зміщення. М408 аналогічний М406, тільки відрізняється тим, що замість польового транзистору використовується операційний підсилювач, та електрично підключений до чутливого елементу як перетворювач *струм-напруга* та з вбудованим резистором зворотнього зв'язку.

Також існує великий ряд модифікацій піродетекторів серії М400М\* на задоволення будь-яких потреб замовників. Одночасно з серією піродетекторів з вільно-підвішеними чутливими елементами М400М\* компанія запропонувала аналогічну серію М420М\*, яка відрізняється від попередньої тим, що чутливий елемент розташований на масивному тепловідводі. Серія М400М\* передбачена для реєстрації теплових потоків низької потужності, а М420М\* — для теплових потоків високої потужності. Обидві серії розраховані в першу чергу на роботу з безперервними та імпульсними лазерами. Для роботи з великими потужностями передбачені світоподілювачі [17].

Ринок систем сигналізації охоронного призначення тих часів диктував замовлення на прості та надійні засоби виявлення зловмисників. Існуючі теплові інфрачервоні детектори не задовольняли потреби ринку. Так.

чутливість термопар була недостатньо високою для використання їх у датчиках руху, а високоомні болометри вимагали коштовних громоздких високостабільних джерел струму, тож болометри також не задовольняли потреби ринку.

Революція на ринку систем сигналізації охоронного призначення відбулась завдяки появі піродетектору M5192. Ця модель має на борту два чутливих елемента консольного горизонтального розташування на основі монокристалу танталату літію з чорним покриттям для збільшення відсотку енергії теплового випромінювання зловмисника, що поглинається, та таким чином підвищуючи дальність дії датчиків руху. Електрично обидва чутливих елементи включені паралельно зворотною полярністю. Відмова від одноелементних піродетекторів була продиктована вимогою стабільності роботи датчиків руху та зниженням рівня хибних спрацьовувань.

У разі використання двохелементного піроелектричного детектора при попаданні теплового потоку на обидва чутливі елементи за рахунок диференційної електричної конфігурації однакових чутливих елементів вихідний сигнал, теоретично, дорівнює нулю. Обидва чутливі елементи підключені до високоомного резистору зміщення номіналом 100 ГΩ та польового транзистору в якості перетворювача імпедансу. Також існують модифікації цього піродетектору, наприклад M5195, який відрізняється від попереднього тим, що обидва чутливих елементи електрично включені послідовно зворотною полярністю та відсутністю чорного покриття. Пізніше, у 1981 р., інші виробники (наприклад Mullard, Великобританія) почали виробляти аналогічні піроелектричні детектори, але на кераміці, та намагались порушити ринкову монополію Eltec Instruments, Inc. щоб зробити цю продукцію більш дешевою [18].

Революція піродетекторів не обійшла стороною і системи протипожежної сигналізації. Так, з розвитком електроніки і досягненням відповідної чистоти матеріалів напівпровідників стала можливою розробка протипожежних сповіщувачів пламені. Так, піроелектричний детектор М406 знайшов широке застосування в системах протипожежної сигналізації у якості чутливого елемента сповіщувача пламені [20].

Холодна війна, постійне напруження відносин між Сполученими Штатами та союзниками в обличчі колективного заходу та Радянським Союзом у вісімдесяті роки минулого століття спровокували розвиток оборонної промисловості країн НАТО та країн Радянського Союзу. Отже, ринок пасивної інфрачервоної техніки на заході поставив нові задачі перед відповідними розробниками. З'явився попит на радіометричні піроелектричні детектори для вимірювання потужностей теплового випромінювання. В ті часи коли сучасних систем координатної навігації типу GPS ще не існувало, широке застосування серед систем протиповітряної оборони мали ракети з головками самонаведення на основі охолодженого квантового детектору *ртуть-кадмій-телур*[19]. Існують усні розмови, що там могли бути використані також піроелектричні детектори замість квантових, але посилення у відкритих джерелах не знайдено.

Однак, знайдені посилення у відкритих джерелах щодо використання піродетекторів, оптимізованих для роботи у терагерцовому діапазоні [12]. Галузі застосування в основному пов'язані з системами безпеки та оборони. Наприклад, використання піродетекторів в ракетах з головками самонаведення, оптимізованих на детекцію коротких електромагнітних імпульсів НВЧ або ТГц діапазонів підвищує ймовірність знищення ворожих активних радарних установок. Теоретичний принцип дії достатньо простий: активна радарна установка виявляється джерелом випромінювання коротких

імпульсів вищеназваних діапазонів, а приймачем випромінювання служить піроелектричний детектор ракети, метою якої є знищення цієї установки. З міркувань зниження вібраційних навантажень та запобіганню руйнування чутливого елемента та його точкового або консольного кріплення найкращим вибором може бути М420 на твердому теплоотводі, або скоріше М420М-8 з більш великою площиною чутливого елемента [20], або можливе диференціальне включення двох однакових піродетекторів, якщо серед множини зразків знайти два, схожих між собою (можливо за технологією О. Бондаренка). В Радянському Союзі серійно вироблялись піроелектричні детектори в Москві та Новосибірську, але інформація по виробництвам в супроводжувальній документації була відсутня, імовірно, в ті часи була засекреченою. Однак сьогодні з відкритих джерел стало відомо, що в Москві виготовленням піродетекторів займалось державне підприємство НДІ “Полус”, яке поставляло продукцію під марками ПМ-2, ПМ-4, ПМ-5, ПП-1 та ПП-3, яке на початку дев’яностих повністю зупинило виробництво. В Новосибірську виготовленням піродетекторів серійно займалось НВП “Восток”. Воно виготовляло піроелектричні детектори під марками МГ-30, МГ-30А, МГ-30Б, МГ-30В, які по заяві виробника мали вищу чутливість ніж серія ПМ. Але якість всіх цих детекторів бажала кращого. В Україні лабораторно виготовлялись зразки піродетекторів при НАНУ під керівництвом Льва Самсоновича Кременчугського [21].

Одним з найважливіших застосувань піродетекторів в галузі високоточної вимірювальної техніки є піроелектричні інфрачервоні газоаналізатори [22]. Піроелектричні матеріали, зокрема танталат літію, обладують високою лінійністю піроелектричного коефіцієнту в діапазоні кімнатних температур, мають малі розміри, та у комбінації з інфрачервоним випромінювачем аналогічних розмірів дозволяють виробляти якісні, надійні,

високоточні газоаналізатори. Принцип дії таких газоаналізаторів достатньо простий. Багато газів мають спектри поглинання електромагнітного випромінювання визначеної довжини хвилі в інфрачервоному діапазоні.

Піроелектричний детектор обладнується вузькополосним інфрачервоним фільтром з пропускною спроможністю саме цієї довжини хвилі. Протягом оптичної осі між випромінювачем та детектором розміщується інфрачервоно-прозора колба з двома патрубками на вхід та вихід газової суміші що потребує аналізу. При бажанні, весь газоаналізатор можна розмістити в сірниковій коробці. Такі високоточні газоаналізатори на піроелектричних детекторах є незамінними приладами для контролю угарного та вуглекислого газу на закритих об'єктах з великою кількістю людей — транспортних засобах — типу пасажирські літаки, космічні шатли, підводні човни. Найкращим вибором є піроелектричний детектор М479 та М479М1, при чому версія М1 має підвищений коефіцієнт підсилення [22].

Багато застосувань піродетекторів існує в галузі авіоніки. Наприклад, відома реалізація датчиків горизонту [23-26] як частини систем навігації небесними світилами на основі піродетекторів. Серед цих приладів відомі такі, як астрономічні компаси, детектуючі небесні світила, автоматические секстанти з оптико-електронними пеленгаторами, в тому числі на базі піродетекторів. Всі ці системи об'єднуються в єдиний високонадійний астроінерційний навігаційний комплекс.

Додатковим засобом може бути прилад координації по зірковому полі на піроелектричному детекторі. Універсальність піродетектору, окрім лінійності піроелектричного коефіцієнту в діапазоні кімнатних температур, є рівномірною чутливістю щодо довжини хвилі у широченному діапазоні, навіть вплоть до міліметрового. Кореляційні системи навігації щодо карт місцевості

потребують матриці чутливих елементів. Такими матрицями можуть стати, наприклад, матриці тонкоплівкових керамічних чутливих елементів на кремнієвій підложці. Координатні системи відстеження розроблялись в Національній Академії Наук України ще за часів Радянського Союзу командою провідних вчених під керівництвом Л. С. Кременчугського. Принцип дій піроелектричного координатора досить простий. Лицьова поверхня чутливого елемента піродетектору покривається електродом повністю, а тильна сторона точково — лише у центрі. В залежності від того в яку точку на координатор потрапляє інфрачервоне випромінювання, зйом електричного сигналу буде свідкувати в якому напрямку треба коригувати рух авіаційного човну.

Координатори використовуються в парі з різноманітними модуляційними дисками, які забезпечують амплітудну модуляцію, частотну, амплітудно-фазову, частотно-фазову та імпульсну модуляції випромінювання, котра в свою чергу ділиться на фазоімпульсну та широтно-імпульсну. Також в авіоніці існують координатори без модуляції випромінювання. Пасивні системи попередження запобіганню зіткненню з іншими літаками на піроелектричних детекторах набагато простіші ніж активні радарні, хоча менш чутливі. Системи інформації щодо наземного стану, такі як радіометри, найкращим чином можуть бути спроектовані на піроелектричному детекторі. Крім того, існують розробки абсолютних, або диференційних радіометрів, котрі ще називають нуль-радіометри, з вбудованою електро-тепловою компенсацією. Такі радіометри мають найбільше точну ступінь вимірювань теплового потоку.

Варто відзначити, що ані болометричний, ані термопарний тепловий детектор не виграють у порівнянні з піроелектричним. Прилади для

реєстрації теплових карт потребують матрицю піроелектричних чутливих елементів. аналогічну вказаної вище [27].

Відоме застосування піродетекторів у якості газоаналізаторів для діагностики стану здоров'я спортсменів [28]. Піроелектричним детектором можна реєструвати швидко текучі події, такі як швидкість снаряду з орудія, теплові реле в енергетиці, датчики перегріву окремих частин силових мереж на піроелектричних детекторах, радіометри вимірювання потужності сонячного випромінювання для роботи в парі з сонячними панелями з метою розрахунку поточної ефективності (КПД) сонячних панелей (ринок в Україні — компанія ДТЕК). Для всіх цих застосувань відмінно підходять двохелементні піроелектричні детектори вертикального розташування на основі монокристалу танталату літію М405 або М407 від американського виробника Eltec instruments, Inc.

Одна із існуючих проблем в Україні, як відомо з джерел новин, є проблема з підривом банкоматів та крадіжкою готівки. Аналіз відкритих новинних джерел (пошукова система Google) показує, що зловмисники закачують легко вибуховий газ всередину банкомату різними способами через отвір картки а потім детонують його. Щоб запобігти імовірним вибухам, які в тому числі складають небезпеку цивільному населенню, було запропоновано використання високочутливих газоаналізаторів на піроелектричних детекторах та в якості виконуючого механізму мав бути передбачений балон з інертним газом. У разі коли зловмисник накачує банкомат вибуховою сумішшю, газоаналізатор має видати сигнал тривоги та запустити накачку банкомату інертним газом з метою попередити вибух. Ця ідея була подана О. Бондаренко, випускником аспірантури кафедри *Проектування та експлуатації електронних апаратів* Харківського національного університету радіоелектроніки [29].

Наприкінці вісімдесятих компанія Eltec instruments, Inc видала ліцензії на виробництво піродетекторів-аналогів M5192 та M5195 компаніям Sentel, GmbH, та Cerberus, AG. На той час вже існувала конкуренція між монокристалічними піроелектричними детекторами та керамічними. Останні ще програвали в своїх характеристиках першим, але значно вигравали в ціні. Першими аналогами M5192 були керамічні піроелектричні детектори LHI958 в звичайному корпусі та LHI954 в меншому за висотою компанії Perkin Elmer. Перші датчики руху на цих піроелектричних детекторах, як відомо, давали багато хибних спрацьовувань. В літературі ці випадки не описані, але добре відомі серед працівників систем сигналізації охоронного призначення тих часів. Пізніше, коли з'явилися піроелектричні детектори на кераміках послідовного включення чутливих елементів, вони стали більш стабільними до хибних спрацьовувань, і співробітники охоронних компаній почали міняти старі датчики руху на нові.

Справа в тому, що датчик руху на піроелектричному детекторі не може бути одночасно і чутливим до зловмисника, і стабільним до хибних спрацьовувань. Тому замість того, щоб вивчати властивості піродетекторів і датчиків руху на їх основі з метою підвищення охороноздатності об'єктів та зниження хибних спрацьовувань, індустрія безпеки відправляла в смітник датчики руху з піроелектричними детекторами паралельного включення чутливих елементів, тим самим робила величезні вразливості в системі безпеки об'єктів починаючи від приватних приміщень до великих підприємств і банків [20].

Після оголошення про руйнацію берлінської стіни 9 листопада 1989 р в східну частину вже об'єднаної Німеччини почались вливання великих інвестицій, на тлі котрих в 1991 р. в Дрездені було відкрито три науково-дослідницьких підприємства: DIAS Infrared, GmbH [30], InfraTec, GmbH [31],

та Heimann, GmbH [32]. Перші дві компанії розпочали виробництво піродетекторів вже нового покоління.

Виробник DIAS Infrared, GmbH спеціалізується на виготовленні піродетекторів на монокристалі танталату літію малої товщини (5 мкм). Компанія випускає як одноелементні піроелектричні детектори радіометричних застосувань (піроелектричні ватметри, піроелектричні пірометри), так і багато елементні детектори для газоаналізаторів. Особливістю є випуск лінійних матриць піродетекторів для інфрачервоних піроелектричних спектрометрів. Також компанія DIAS Infrared, GmbH постачає на ринок готові прилади в галузі інфрачервоної техніки — імітатори абсолютно чорного тіла, інфрачервоні камери високої роздільної здатності, та інші.

Компанія InfraTec, GmbH виготовляє одноелементні піроелектричні детектори радіометричних застосувань та багатоелементні для газоаналізаторів. Більшість продукції виготовляється за спеціальною технологією low-misgo, що дозволяє знижувати вплив вібрацій на чутливий елемент практично до нуля. Компанія також постачає унікальні піроелектричні спектрометри на основі фільтру Фабрі-Перо, інтегрованого в корпус самого піродетектору.

На сьогоднішній день компанія Heimann Sensor, GmbH випускає термопарні детектори та матриці на їх основі. Термопарні детектори цього виробника зайняли лідируючу позицію в портативних медичних пірометрах для діагностування людей на Covid19.

Піроелектричні детектори використовуються в багатьох галузях науки і техніки від дешевих моделей в датчиках руху до коштовних в газоаналізаторах або спектрометрах. Закон S.3522 Сполучених Штатів Америки про ленд-ліз для оборони демократії Україною від 09 травня 2022 р

[29] показує, що оборонна галузь на сьогоднішній день є актуальною. Отже, використання піродетекторів в цій галузі теж є задачею актуальною. Аналіз відкритих джерел показує, що найбільш інформативною з точки зору ісходних даних для виконання магістерської роботи є продукція компанії Eltec Instruments, Inc. Тож, всі дослідження та математичні розрахунки будуть проводитись згідно з документацією саме цієї компанії, як найбільш інформативною. Метою дослідження є отримання динамічних характеристик піродетекторів. Поставлена мета досягається шляхом будування алгоритмів розрахунку на основі існуючих даних від виробника та будуванні відповідних амплітудно-частотних графіків.

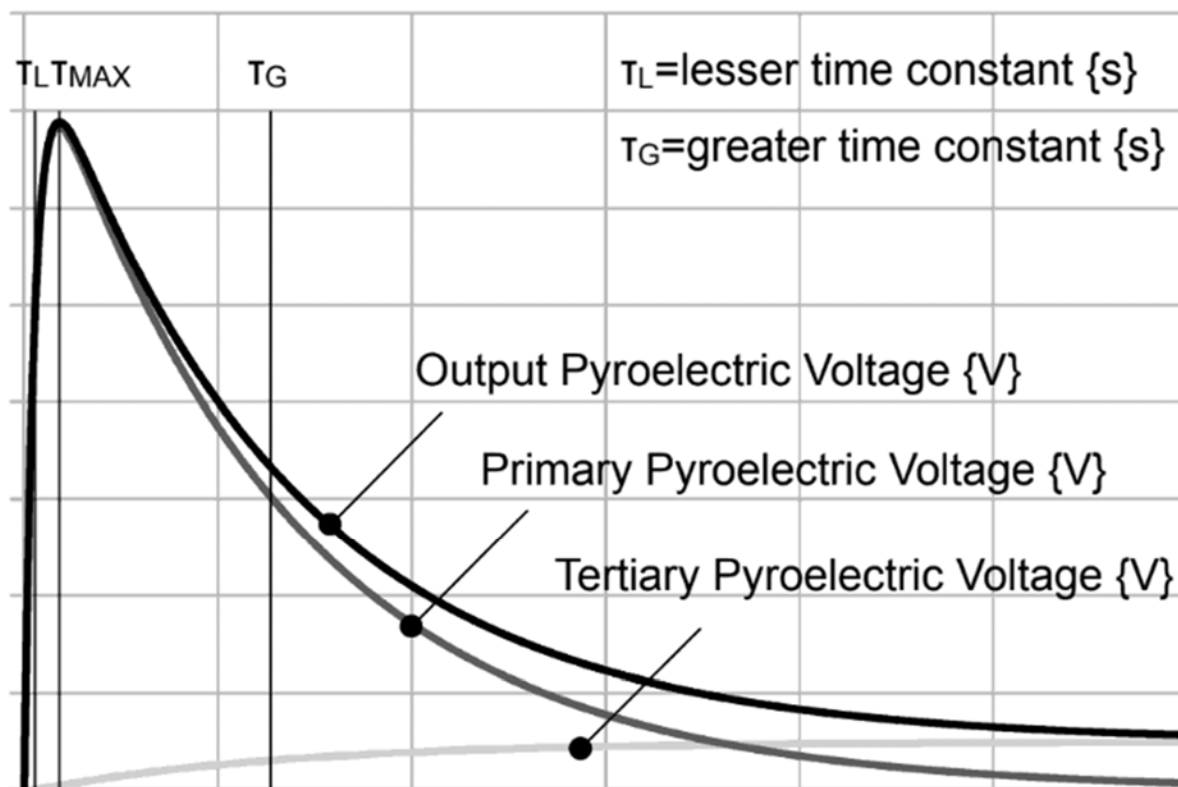
## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІРОДЕТЕКТОРІВ

### 2.1 Математичний опис піродетекторів

Піроелектричний детектор є перетворювачем теплової енергії в електричну. Це означає, що цей тип детекторів має як теплові властивості, так і електричні, а саме — теплову інерційність та електричну. Теплова інерційність залежить від теплоємності чутливого елемента та теплових втрат. Електрична — від електричних. Теплова стала часу є відношенням теплоємності чутливого елемента до теплових втрат. Електрична стала часу є добутком електричної теплоємності чутливого елемента на резистор зміщення. Сталі часу відносяться до динамічних характеристик піродетекторів. На часовій осі вони розташовуються в порядку збільшення [13].

До коефіцієнту передачі відносяться в першу чергу піроелектричні коефіцієнти. Виділено щонайменше три види піроелектричних коефіцієнти відповідно до трьох типів піроелектричних ефектів. Первинний піроелектричний ефект — здатність піроелектричного матеріалу перетворювати теплову енергію на електричну, основний пірокоефіцієнт, корисний. Вторинний піроелектричний ефект — реакція піроелектричного матеріалу на вплив вібрацій. Цей піроелектричний ефект шкідливий, бо вносить невизначеність в результаті вимірювань. Бажано уникати впливу вібрацій на піроелектричні детектори. Третинний піроелектричний ефект — здатність піроелектричного матеріалу генерувати електричні заряди постійної величини при постійному тепловому потоці. Згадка про залишковий сигнал згадується в [34], та математично була описана в [13]. В

кваліфікаційній роботі передбачається, що піроелектричні детектори працюють без впливу вібрацій, тож вторинний піроелектричний ефект не розглядається (рисунок 2.1).

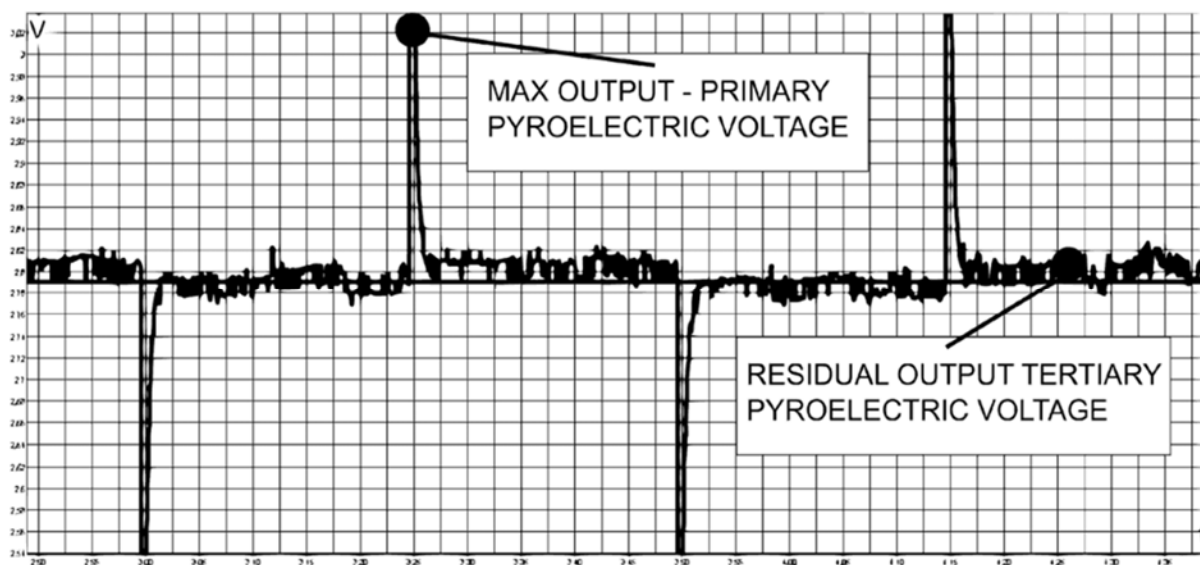


(Ілюстрація публікується з письмового дозволу автора ілюстрації О.  
Бондаренка)

Рисунок 2.1 – Парціальні первинний та третинний піроелектричні ефекти

Оскільки природа піродетекторів має математичний вигляд полосового фільтра з тепловою та електричною частотами зрізу, має сенс використання їх у комплексі з оптико-механічними модуляторами. На практиці такий модулятор встановлюється біля піродетектору таким чином, щоб він перекривав оптичну вісь останнього. Всі комерційні прилади, які працюють в

частотній області, обладнуються модуляторами. Завдяки існуванню модуляторів тепловий сигнал, який потрапляє на піроелектричний детектор, має синусоїдальну форму. Отже, теорія піроелектричного детектора будується на розумінні, що він працює з чисто синусоїдальними сигналами (рисунок 2.2).



(Ілюстрація публікується з письмового дозволу автора ілюстрації О. Бондаренка)

Рисунок 2.2 – Експериментальні дані піродетектора М408 виробництва Eltec Instruments, Inc

Запишемо фундаментальну для всіх теплових детекторів передаточну функцію теплового балансу, або відгук чутливого елемента на зміну його температури

$$\Delta T(s) = \Phi R_K \frac{1}{\tau_{TS} s + 1}, [K]. \quad (2.1.1)$$

Оскільки піроелектричний детектор генерує електричні заряди у відповідь не на зміну температури чутливого елемента, а на зміну швидкості температури чутливого елемента, запишемо фундаментальну для всіх теплових детекторів передаточну функцію відгуку чутливого елемента на зміну швидкості його температури

$$\Delta\Psi(s) = \Phi R_K \frac{\tau_T s}{J \tau_T s + 1}, [\text{K/c}]. \quad (2.1.2)$$

Ці дві передаточні функції мають найважливіше значення в теорії піродетектору. Передаточна функція по зміні температури впливає на постійну складову піроелектричного струму, а передаточна функція по зміні швидкості температури — на змінну складову піроелектричного струму. Отже, піроелектричний струм за первинним піроелектричним ефектом складає

$$\Delta I_1(s) = \Phi R_A \frac{\tau_T s}{\bar{W} \tau_T s + 1}, [A]. \quad (2.1.3)$$

та за третинним

$$\Delta I_3(s) = \Phi R_A \frac{1}{\bar{W} \tau_T s + 1}, [A]. \quad (2.1.4)$$

Передаточна функція вихідної напруги піродетектору за первинним піроелектричним ефектом

$$\Delta U_1(s) = \Phi R_V \frac{\tau_T s}{\bar{W} (\tau_T s + 1)(\tau_E s + 1)}, [B]. \quad (2.1.5)$$

та за третинним

$$\Delta U_3(s) = \Phi R_V \frac{1}{\bar{W} (\tau_T s + 1)(\tau_E s + 1)}, [B]. \quad (2.1.6)$$

Повне покрокове рішення цих рівнянь представлено в [13].

## 2.2 Засіб вимірювання чутливості піродетекторів

Оскільки піроелектричний детектор початково є тепловим детектором, для його тестування застосовується спеціальний тепловий калібратор — абсолютно чорне тіло. Піроелектричний детектор розташовується на оптичній осі з абсолютно чорним тілом на такій відстані, щоб робоча поверхня цього тіла повністю входила в кут зору піродетектору. Зазвичай, це відстань достатньо мала і складає приблизно 5..10 см. За необхідністю, з метою коригування куту зору використовуються спеціальні зовнішні апертури часто у кількості двох штук. Між ними розташовується оптико-механічний модулятор таким чином, щоб модуляційний диск забезпечував синусоїдально модульований тепловий потік.

Піроелектричний детектор підключається до спеціальної схеми-драйвера, яку бажано запитувати від хімічного джерела живлення (акумулятор) через стабілізатор напруги.

Вихідний сигнал піродетектора підключається до входу синхронного підсилювача, а далі сигнал подається на вхід осцилографа. Вхідна величина теплового потоку на піроелектричний детектор має бути надана виробником абсолютно чорного тіла або взята з авторитетного джерела інформації.

Розрахунок чутливості йдеться через перерахунок на діапазон частот шириною 1 Гц. В специфікації щодо чутливості зазвичай вказуються такі параметри з типовими значеннями: температура калібровочної поверхні абсолютно чорного тіла, частота модуляції, ширина діапазону частот, температура навколишнього середовища: 1000 В/Вт (500 К, 10 Гц, 1 Гц, 25 °С, без фільтру).

Замір середньоквадратичного рівня щільності шуму проводиться за відсутності абсолютно-чорного тіла та оптико-механічного модулятора при

закритому вхідному вікні піродетектора. Насправді проводиться реєстрація даних вихідної напруги та обробка їх завдяки алгоритму швидкого перетворення Фур'є. З отриманих даних виділяється значення шуму на частоті модуляції, наприклад  $2 \mu\text{Vrms}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Розрахунок середньоквадратичної виявної здатності виконується посередництвом середньоквадратичного рівня чутливості та площини чутливого елемента. Значення виявної здатності супроводжується тими ж умовами, що і вольт-ватна чутливість, а саме, наприклад  $1.5\text{E}8 \text{ см}\sqrt{\text{Гц}}/\text{Вт}$  (500 К, 10 Гц, 1 Гц, 25 °С, без фільтру).

Іноді компанія-виробник з метою контролю якості своєї продукції може проводити тестування власної продукції на різних частотах модуляції. Результати тестувань ряду піродетекторів компанії Eltec Instruments, Inc. наведені в наступному підрозділі.

### 2.3 Амплітудно-частотні характеристики існуючих піродетекторів Eltec Instruments, Inc.

В минулому підрозділі було розглянуто стандартну технологію тестування піродетекторів.

В даному підрозділі наводяться графічні дані щодо офіційних чисельних даних чутливостей ряду комерційних піродетекторів наданих компанією Silverlight, ltd. [35], офіційним дистриб'ютором продукції Eltec Instruments, Inc. Червоною лінією відзначені типові значення, а синьою та жовтою — мінімальні та максимальні відхилення відповідно (рисунки 2.3 – 2.9).

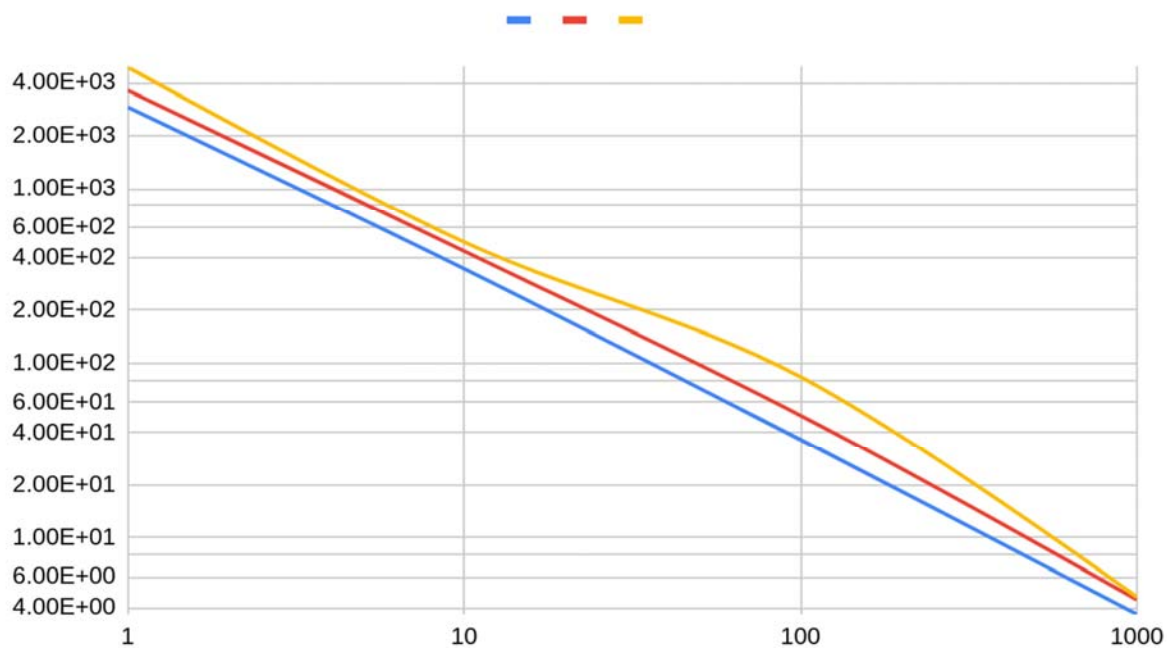


Рисунок 2.3 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика піродетектора М404

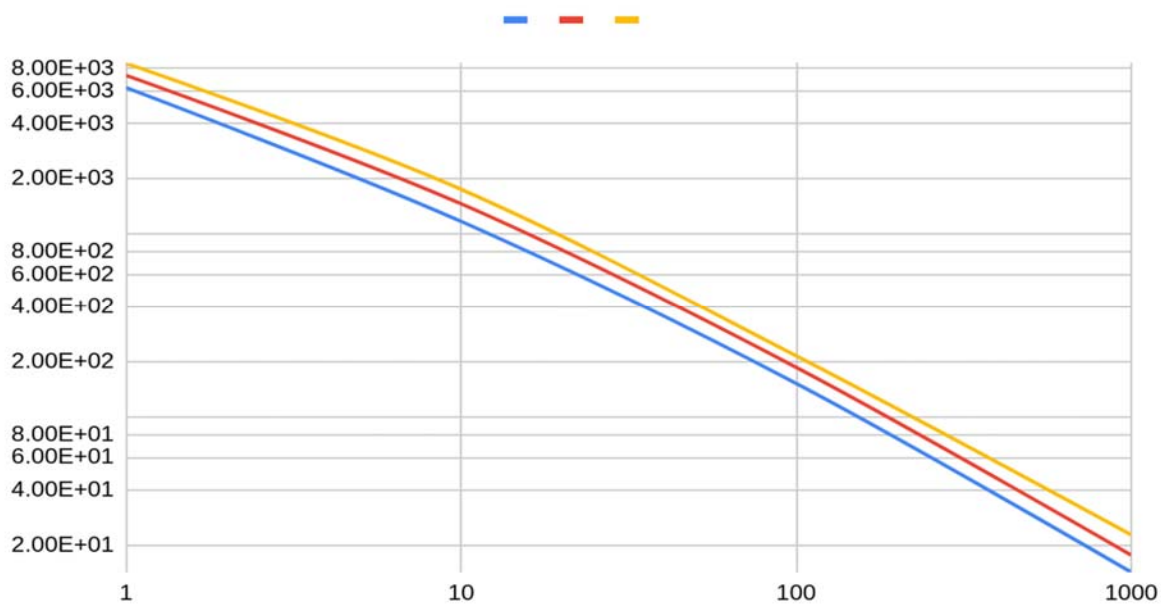


Рисунок 2.4 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика піродетектора М405

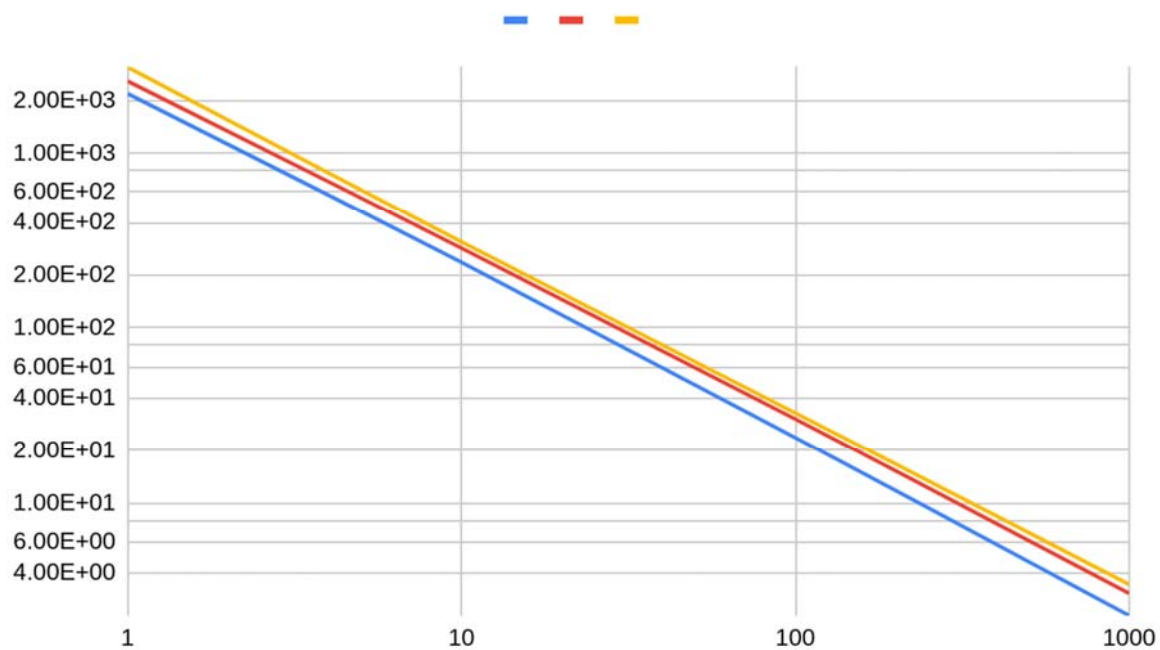


Рисунок 2.5 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика піродетектора М406

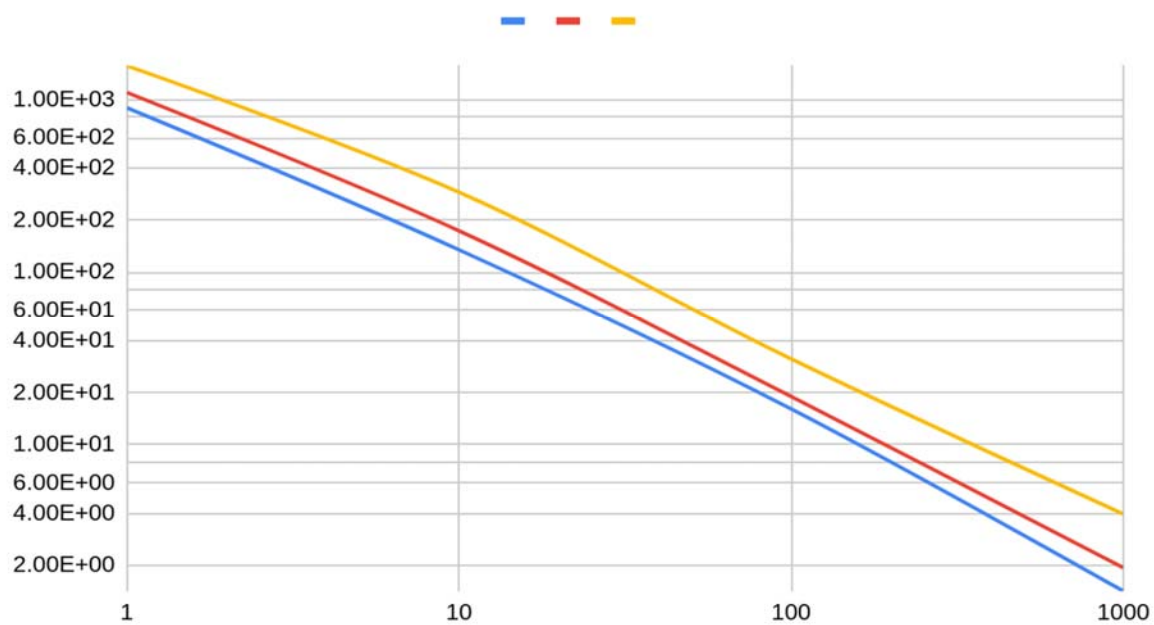


Рисунок 2.6 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика піродетектора М407

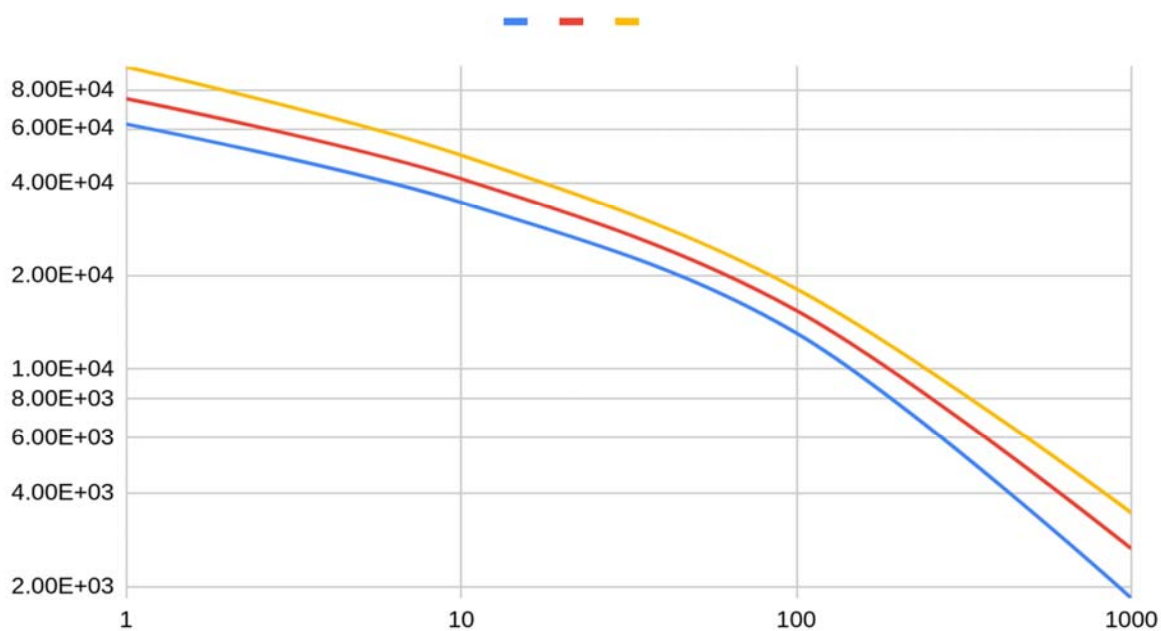


Рисунок 2.7 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика  
піродетектора М408

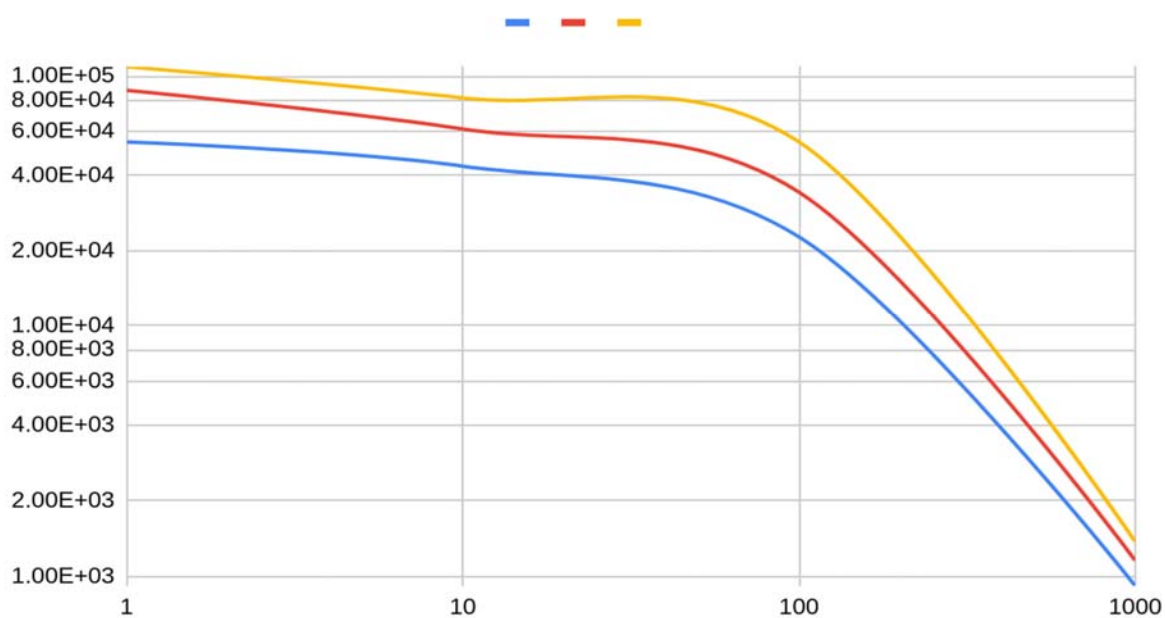


Рисунок 2.8 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика  
піродетектора М441

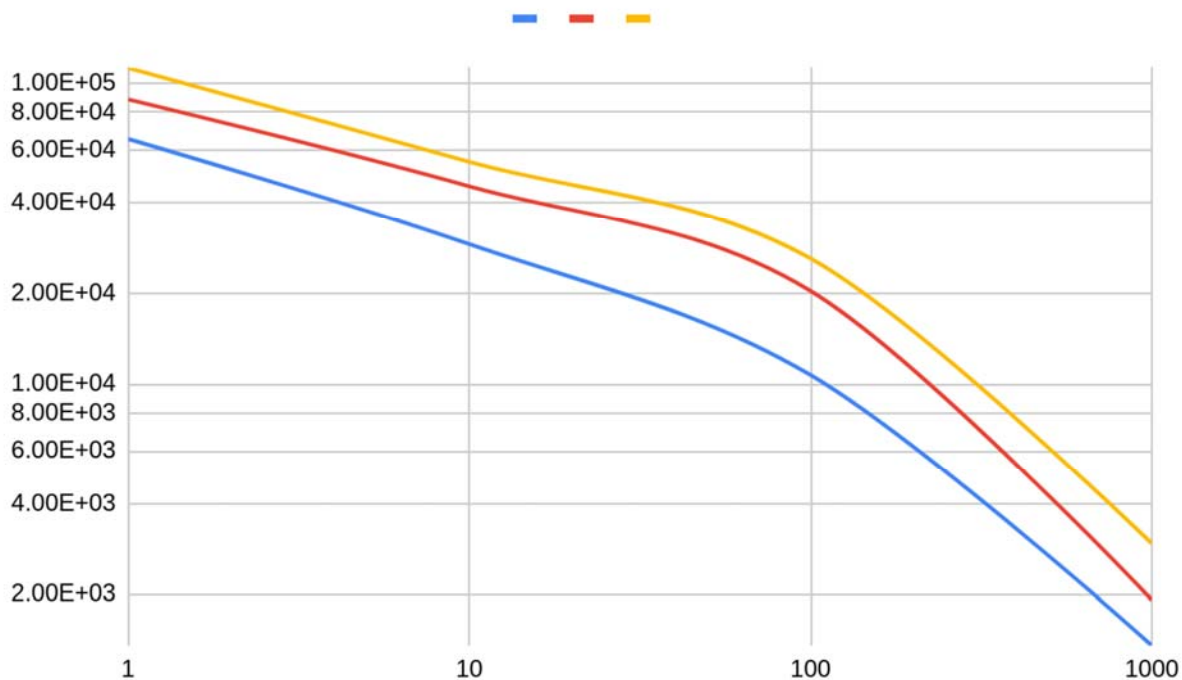


Рисунок 2.9 – Експериментальна амплітудно-частотна характеристика піродетектора M446

З наведених графіків видно, що ті піродетектори, що працюють в режимі по напрузі, мають гладкі спадаючі амплітудно-частотні залежності та більше підходять до роботи з низькими значеннями частот модуляції. Піродетектори в режимі роботи за струмом придатні до роботи з більш високими частотами модуляції.

#### 2.4 Однотипність піродетекторів

Однотипність піродетекторів диктується промисловими допусками. Піродетектори від Eltec Instruments, Inc. мають складні конструктивні особливості, тому повний цикл автоматизації технологічно не завжди можливий. У випадках, коли використовується людський труд, говорити про

строгу однотипність продукції не має сенсу. Як правило, до параметрів які відносяться до класифікації однотипності, є середні значення, екстремальні (мінімальні та максимальні), стандартні відхилення, дисперсії, граничні значення, відхилені значення [36]. Проведення таких досліджень досить коштовне, тому скористаємося даними, наданими компанією Silverlight, ltd.

Як видно з наведеного графіку (рис. 2.10), розкид значень щодо чутливості досить великий. Це означає, що однаковість піродетекторів треба брати під постійний контроль.

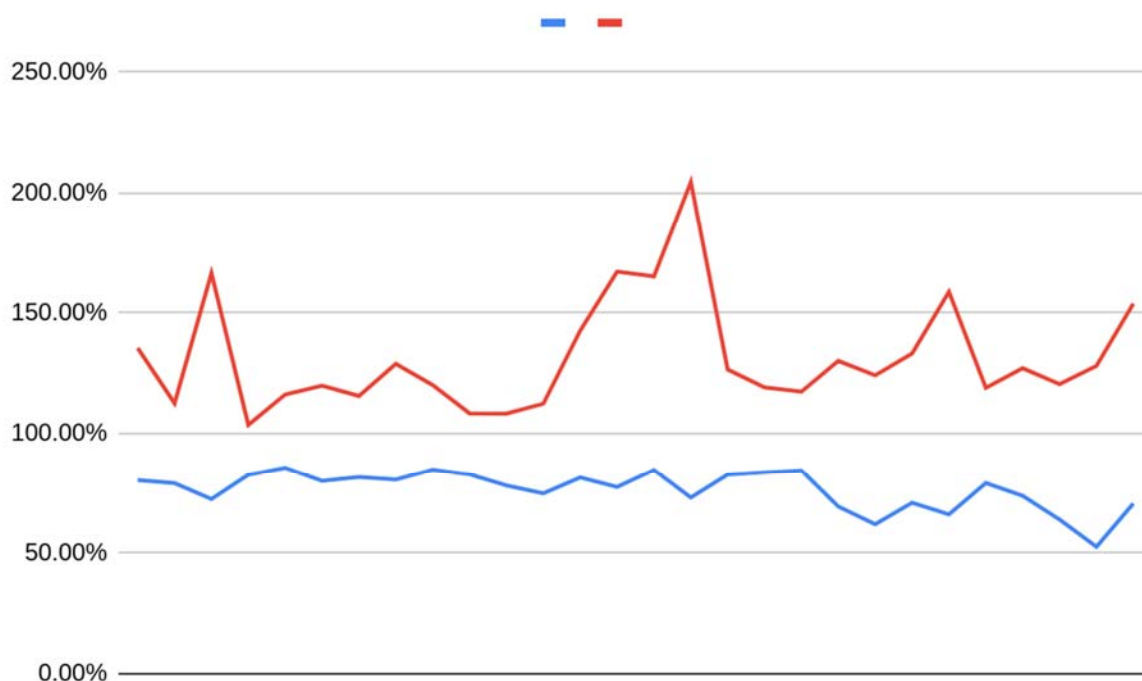


Рисунок 2.10 – Однотипність піродетекторів Eltec Instruments, Inc. згідно з відсотковими відхиленнями.

## 3 РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТЕЙ ДЛЯ ПРОДЕТЕКТОРІВ

### 3.1 Теоретичні аспекти

Будування математичних моделей має велике значення в задачах оптимізації систем автоматичного керування. Отримання математичних описів реальних процесів можливе завдяки кількості засобів, однак самим ефективним є дослідження перехідних процесів та апроксимація їх відповідними математичними рівняннями. Сам процес отримання математичних рівнянь є ручною роботою і досить рутинною [14].

Після отримання рівнянь перехідних процесів зазвичай робиться перетворення по Лапласу з метою отримання передаточних функцій, використовують в автоматизації, та подальша заміна оператора Лапласа показником похідної, якщо треба отримати розуміння за яким законом працює той або інший процес що досліджується. В галузях програмування диференційні рівняння можуть бути замінені рівняннями в кінцевих різностях.

Отримання інших характеристик, окрім перехідних, є дещо складною задачею, але ця проблема має рішення. Рішення полягає в моделюванні диференційного рівняння шляхом використання аналогових електронних елементів за правилами аналогової схемотехніки в будь-якому зручному середовищі. Подібне моделювання, як показано в [13], дозволяє відтворювати величезну кількість частотних характеристик, в тому числі досить складних, але алгоритми котрих вже закладені у відповідні симулятори [37]. Отже, має сенс вивчати мистецтво математичного моделювання та будування математичних моделей в середовищах симуляторів електронної схемотехніки.

Вихідними даними для будовання еквівалентних електричних схем є передаточні функції. Ці складні функції потім розділяються на більш прості, еквівалентні добутку фільтрів верхніх та нижніх частот. Кожен фільтр будується в симуляторі своєю еквівалентною схемою. Математичний добуток відзначається в симуляторі операційним підсилювачем в режимі повторювача напруги. Чутливість регулюється вхідним резистором, а тепловий потік заміщується еквівалентним нормованим електричним струмом [13].

### 3.2 Підготовка чисельних даних та моделювання

Підготовка чисельних даних відбувається шляхом аналізу відкритих джерел компанії Eltec Instruments, Inc., та відповідних довідників. Параметри піроелектричного матеріалу танталату літію наведені в таблиці 3.1 [38], та його додаткові коефіцієнти приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Деякі параметри монокристалу танталату літію.

№	Параметр танталату літію	Знач.	Од.Вимір.
1	Піроелектричний коефіцієнт	$p = 170$	$\frac{\mu\text{C}}{\text{m}^2\text{K}}$
2	Відносна діелектрична проникність	$\varepsilon = 47$	—
3	Тангенс кута діелектричних втрат	0.001	—
4	Питома теплоємність	$C_{T,SP} = 3.2 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{m}^3\text{K}}$
5	Температура Кюрі	603	°C

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти піродетектора.

№	Коефіцієнти піродетектора	Знач.	Од.Вимір.
1	Коефіцієнт вхідного вікна	$\epsilon_w = 0.7$	—
2	Коефіцієнт кута огляду	$\beta = 0.67$	—
3	Коефіцієнт поглинання теплового потоку	$\alpha = 0.8$	—
4	Паразитна ємність резистору ОЗ	$C_{shunt} = 0.1$	пФ
5	Температура Кюрі	603	°C

### 3.3 Розрахунки піродетекторів

#### 3.3.1 Піроелектричний детектор М404

Стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.1)$$

електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi 0.01 \text{ Гц}} = 15.915 \text{ с} \quad (3.2)$$

Діаметр чутливого елемента складає 2 мм. Отже площа становить

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.002 \text{ мм})^2}{4} = 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.3)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.4)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$\begin{aligned}
 R_{\frac{B}{BT}} &= \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\
 &= \frac{170 \frac{\mu C}{M^2 K} \cdot 3.1416 \cdot 10^{-6} M^2 \cdot 5 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0005 \frac{Дж}{К}} = \\
 &= 2 \cdot 10^5 \frac{В}{ВТ}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною.

Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.3.

Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М404 виробництва Eltec Instruments, Inc. зображена на рисунку 3.1.

Таблиця 3.3 – Дані М404

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	596.10
10	139.84
100	16.02
1,000	1.63

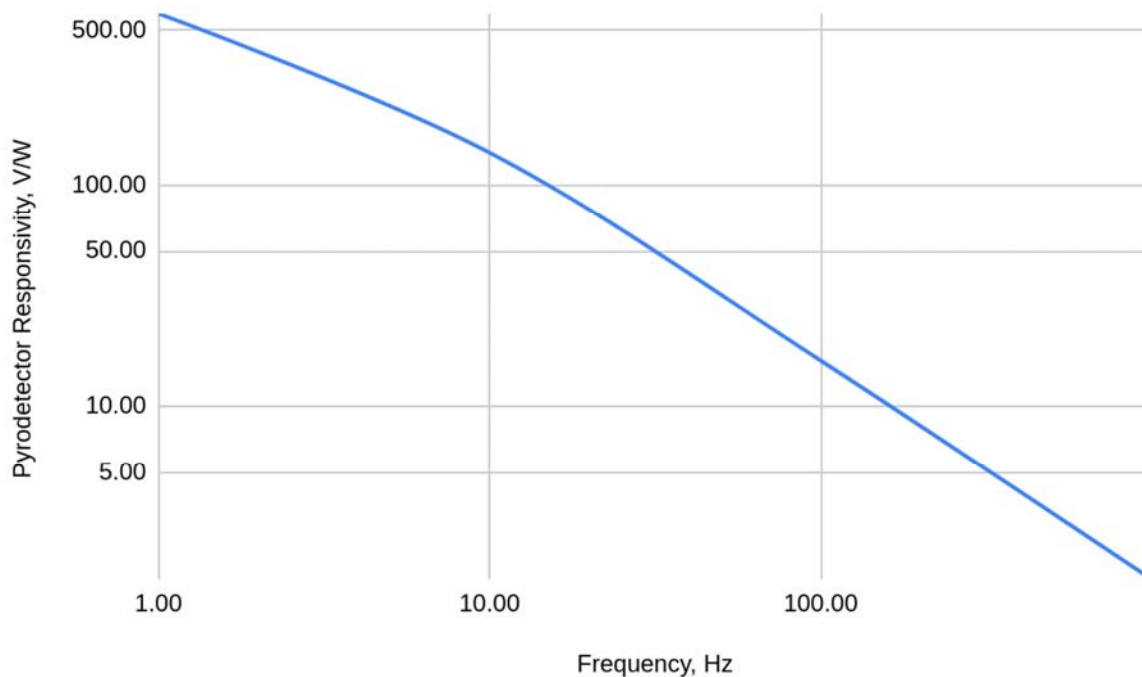


Рисунок 3.1 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M404 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.2 Піроелектричний детектор M405

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.6)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.7)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.8)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_P = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{\text{Ам}^2}{d\text{м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 20.8 \text{ пФ} \quad (3.9)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = (2 \cdot C_{P\text{пФ}} + C_{J\text{FET пФ}}) R_E \Omega = \\ = (2 \cdot 20 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 100 \text{ Г}\Omega = 4.462 \text{ с} \quad (3.10)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.11) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 39865 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.4 та рисунок 3.2.

Таблиця 3.4 – Дані M405

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	3,234.80
10	776.32
100	88.04
1,000	8.92

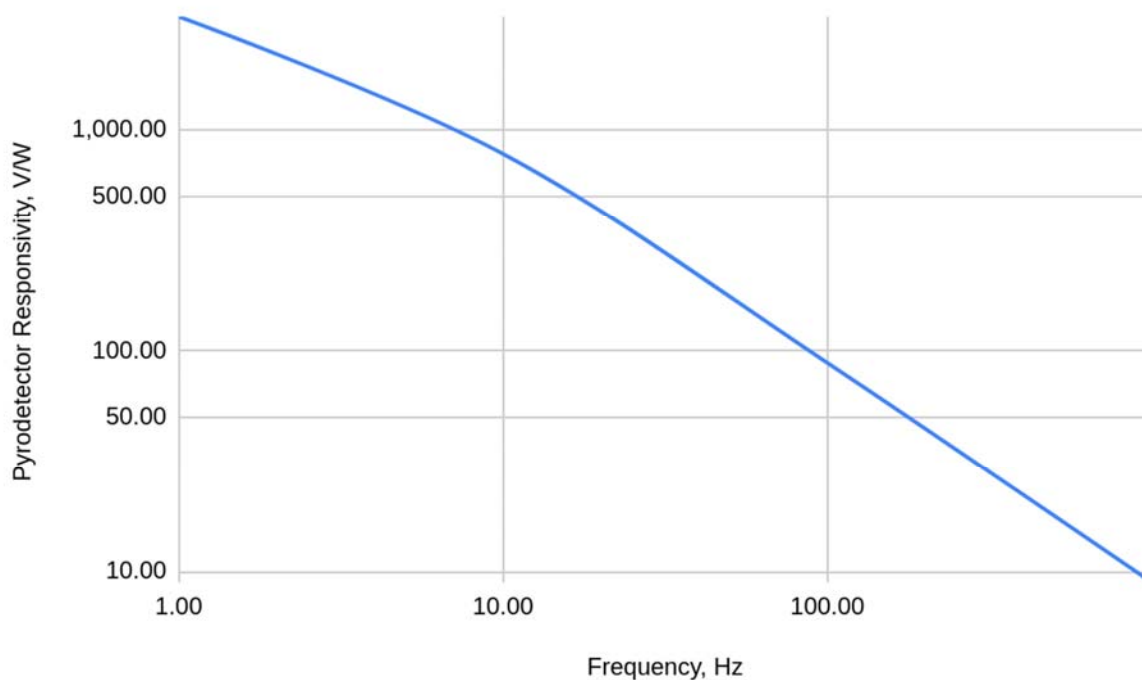


Рис. 3.2 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М405 виробництва Eltec Instruments, Inc

### 3.3.3 Піроелектричний детектор М405М6

Стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.12)$$

Розміри чутливого елемента складають 2.5 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 2.5 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.13)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{М}^3\text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \text{М}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{М} = 0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.14)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{М}} \varepsilon \frac{A \text{М}^2}{d \text{М}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}} \cdot 47 \cdot \frac{6.25 \cdot 10^{-6} \text{М}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{М}} = 52 \text{пФ} \quad (3.15)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = (2 \cdot C_p \text{пФ} + C_{JFET} \text{пФ}) R_E \Omega = \\ = (2 \cdot 52 \text{пФ} + 3 \text{пФ}) \cdot 100 \text{Г}\Omega = 10.7 \text{с} \quad (3.16)$$

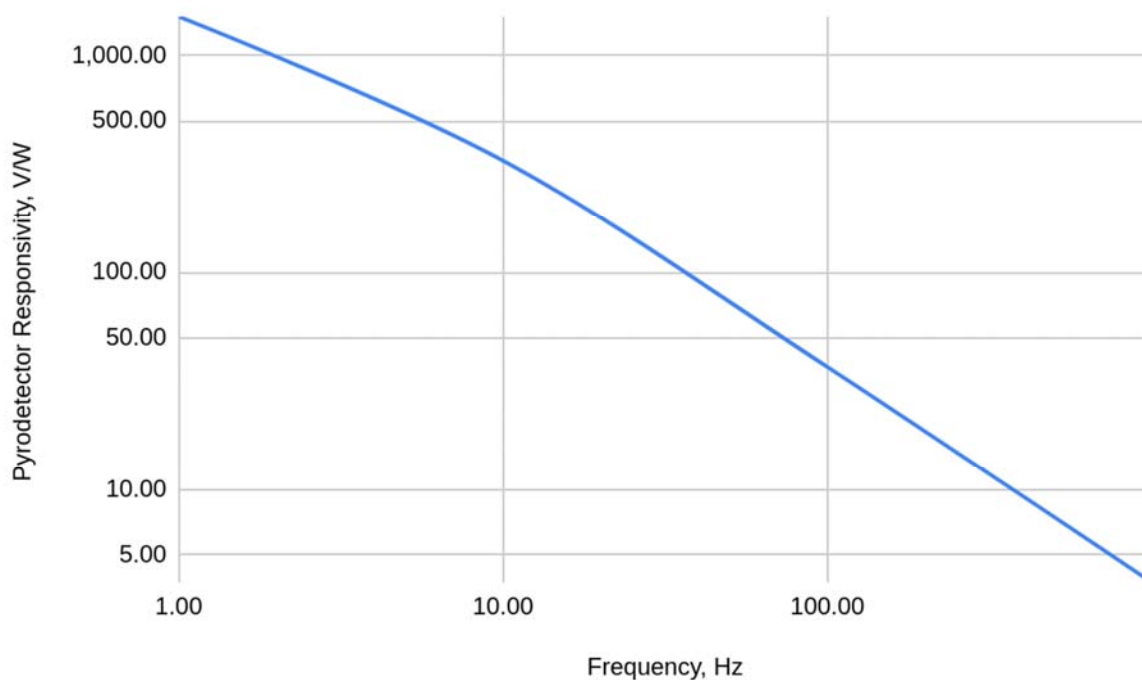
Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.17) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{М}^2\text{К}} 6.25 \cdot 10^{-6} \text{М}^2 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 39865 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.5 та на рисунку 3.3.

Таблиця 3.5 – Дані М405М6.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	1,510.12
10	327.92
100	36.76
1,000	3.72



Рисунку 3.3 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М405М6 виробництва Eltec Instruments, Inc

### 3.3.4 Піроелектричний детектор М406

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.18)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.08 \text{ Гц}} = 2 \text{ с} \quad (3.19)$$

Діаметр чутливого елемента складає 2 мм. Отже площа становить

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.002 \text{ мм})^2}{4} = 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.20)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$C_T = C_{T,SPAd} = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times$ $\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	(3.21)

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 6.5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 25912 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.22)
--	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною.

Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 2.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.6 та на рисунку 3.4.

Таблиця 3.6 – Дані М406

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	3,361.01
10	1,066.48
100	126.92
1,000	12.93

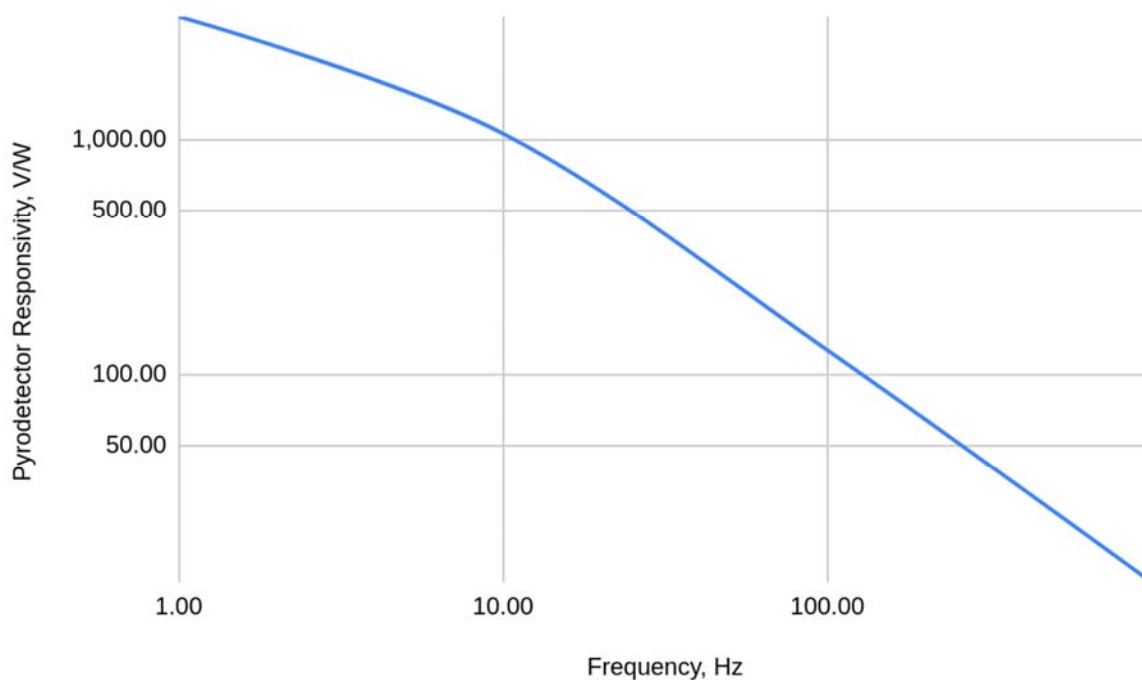


Рис. 3.4 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M406 виробництва Eltec Instruments, Inc

### 3.3.5 Піроелектричний детектор M40612

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi 0.24 \text{ Гц}} = 0.663 \text{ с} \quad (3.23)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi 1.2 \text{ Гц}} = 0.133 \text{ с} \quad (3.24)$$

Розміри чутливого елемента складають 2 мм × 2 мм. Отже площа становить

$A = 2\text{мм} \cdot 2\text{мм} = 4 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$	(3.25)
---	--------

Теплоємність чутливого елементу дорівнює

$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \text{м}^2 \times$ $\times 5 \cdot 10^{-5}\text{м} = 0.0006 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	(3.26)
--	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 4 \cdot 10^{-6} 4 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0006 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 1595 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.27)
--	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.3.5 та рисунку 3.5.

Таблиця 3.7 – Дані М40612

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	561.24
10	594.83
100	109.88
1000	11.89

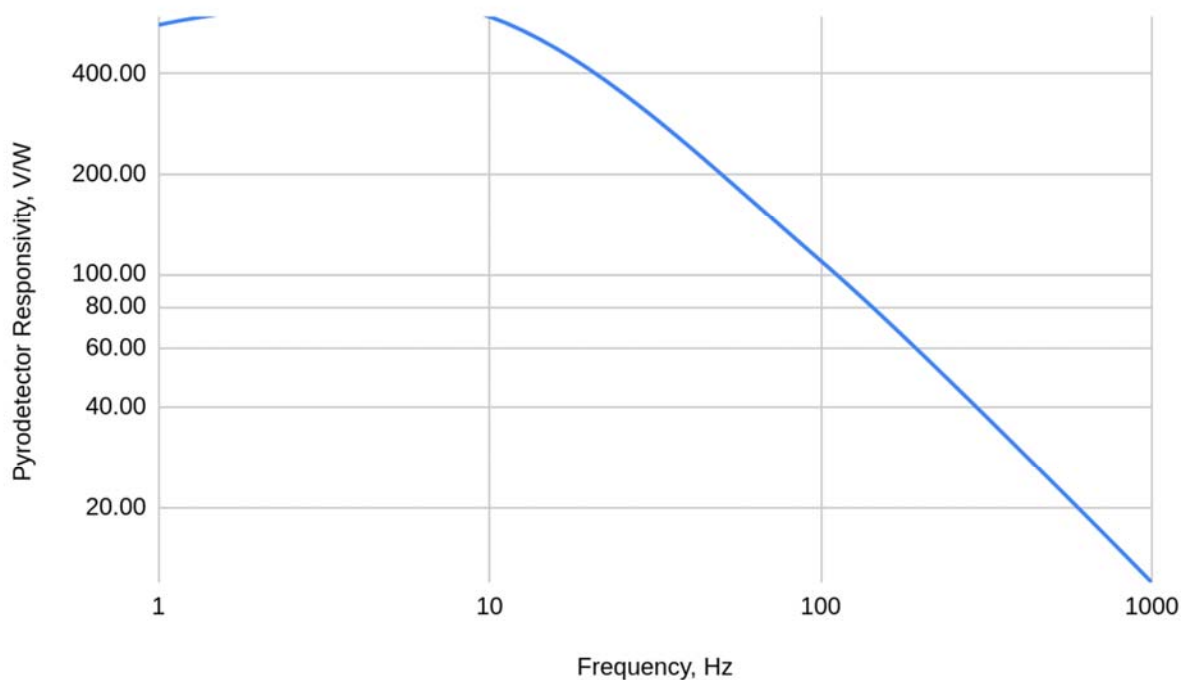


Рисунок 3.5 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M40612 виробництва Eltec Instruments, Inc

### 3.3.6 Піроелектричний детектор M40623

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.28)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.75 \text{ Гц}} = 0.212 \text{ с} \quad (3.29)$$

Розміри чутливого елемента складають 2.5 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$A = 2.5\text{мм} \cdot 2.5\text{мм} = 6.25 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$	(3.30)
--	--------

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \text{м}^2 \times$ $\times 5 \cdot 10^{-5} \text{м} = 0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	(3.31)
---	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 1595 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.32)
---	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною.

Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.8 та рисунку 3.6.

Таблиця 3.8 – Дані М40623

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	512.09
10	441.85
100	70.74
1000	7.48

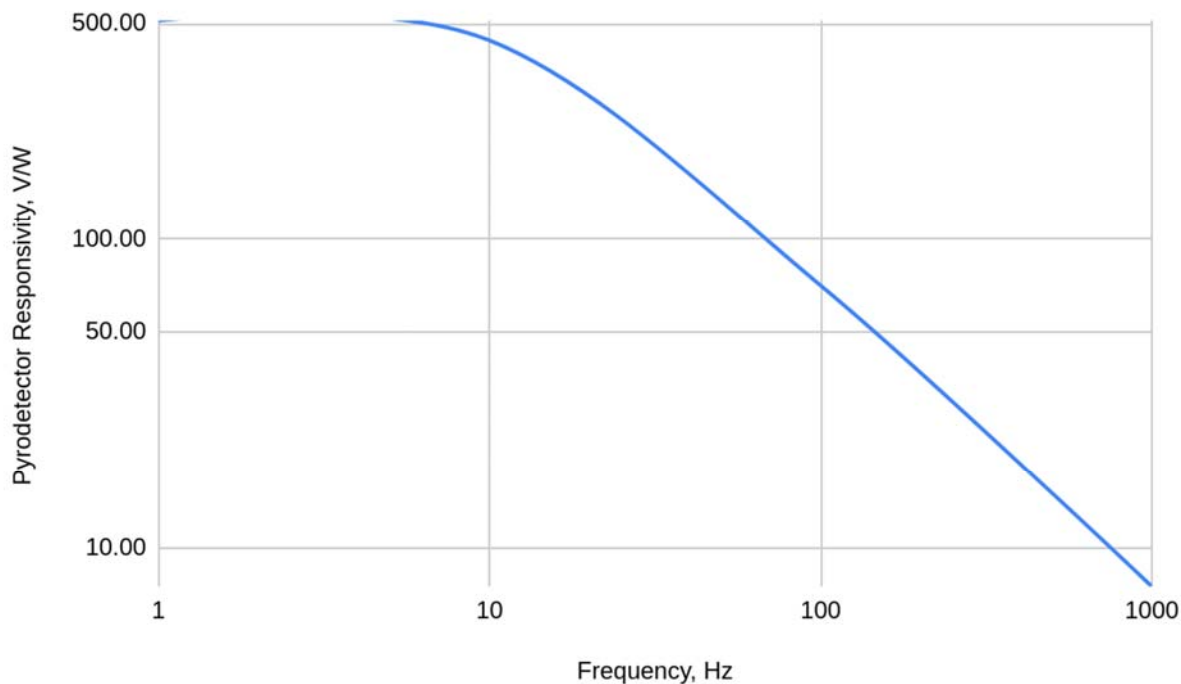


Рисунок 3.6 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M40623 виробництва Eltec Instruments, Inc

### 3.3.7 Піроелектричний детектор M406M39

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.33)$$

Діаметр чутливого елемента складає 2 мм. Отже площа становить

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.002 \text{ мм})^2}{4} = 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.34)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.35)$$

$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	
--	--

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}}$ $= 26 \text{ пФ}$	(3.36)
---	--------

Електрична стала часу дорівнює

$\tau_E = (C_p \text{ пФ} + C_{JFET} \text{ пФ}) R_E \Omega =$ $= (26 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 50 \text{ Г}\Omega = 2.765 \text{ с}$	(3.37)
---	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 19932 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.38)
--	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Дані М406М39.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	2,060.04
10	601.31
100	70.72
1000	7.19

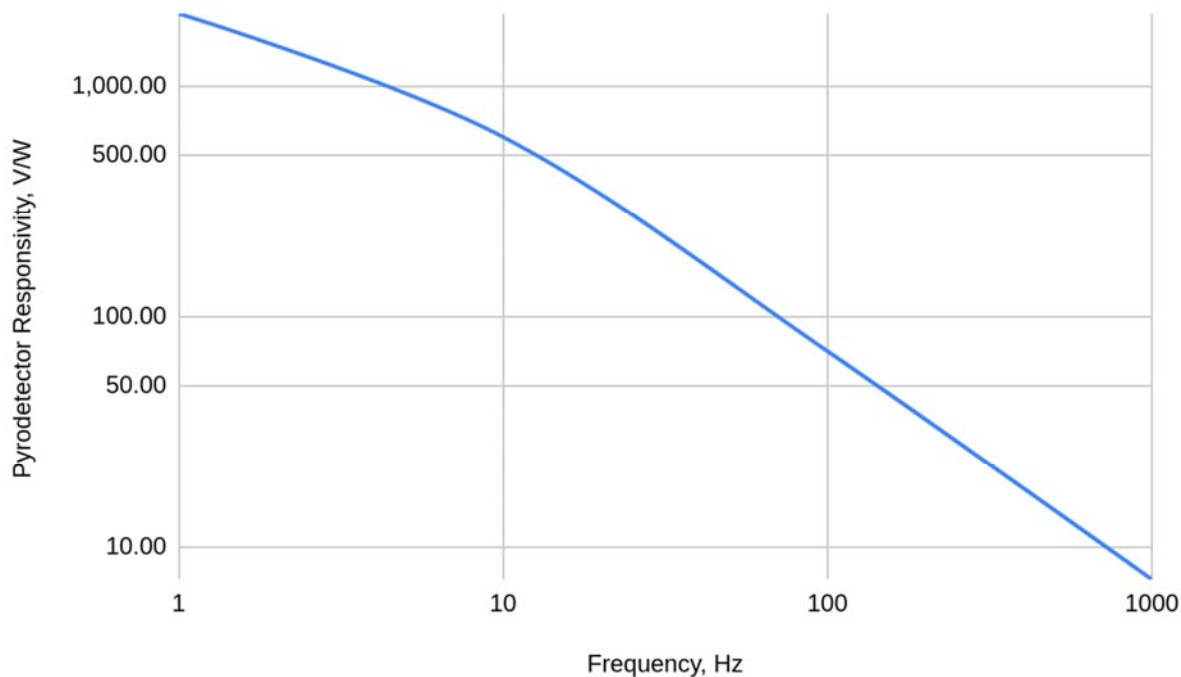


Рис. 3.7 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М406М39 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.8 Піроелектричний детектор М406МВК

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.39)$$

Розміри чутливого елемента складають 2.5 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 2.5 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.40)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.41)$$

$$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 52 \text{ пФ} \quad (3.42)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\begin{aligned} \tau_E &= (C_p \text{ пФ} + C_{JFET} \text{ пФ}) R_E \Omega = \\ &= (52 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 2 \text{ Г}\Omega = 0.11 \text{ с} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$\begin{aligned} R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} &= \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\ &= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2 \text{К}} 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 2 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ &= 797 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Дані М406МВК.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	279.40
10	328.03
100	65.39
1000	7.17

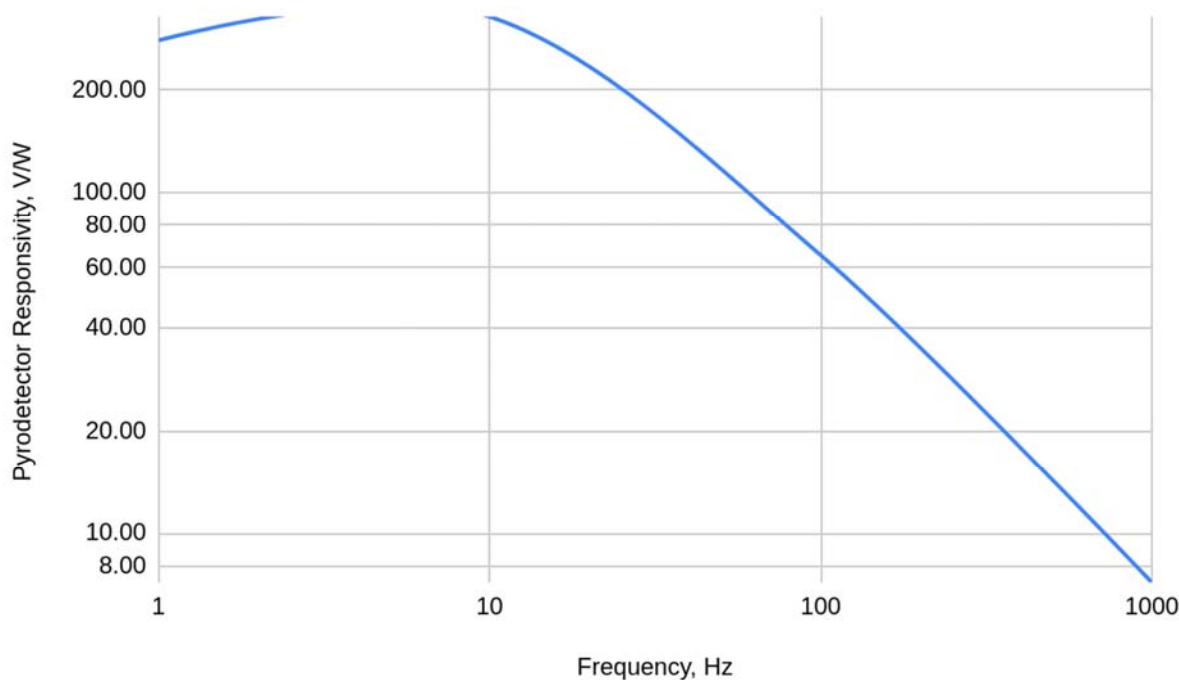


Рис. 3.8 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М406МВК виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.9 Піроелектричний детектор М406МВН

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.45)$$

Діаметр чутливого елемента складає 2 мм. Отже площа становить

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.002 \text{ мм})^2}{4} = 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.46)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.47)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{M} \varepsilon \frac{A_M^2}{d_M} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M} \cdot 47 \cdot \frac{3.1416 \cdot 10^{-6} M^2}{5 \cdot 10^{-5} M} = 26 \text{ пФ} \quad (3.48)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = (C_p \text{ пФ} + C_{JFET} \text{ пФ}) R_E \Omega = (52 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 65 \text{ Г}\Omega = 0.058 \text{ с} \quad (3.49)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$\begin{aligned} R_{\frac{B}{Bt}} &= \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\ &= \frac{170 \frac{\mu\text{C}}{\text{M}^2\text{K}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \cdot 6.5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0005 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ &= 25912 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Дані M406MBN.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	953.32
10	1,417.91
100	375.29
1000	43.86

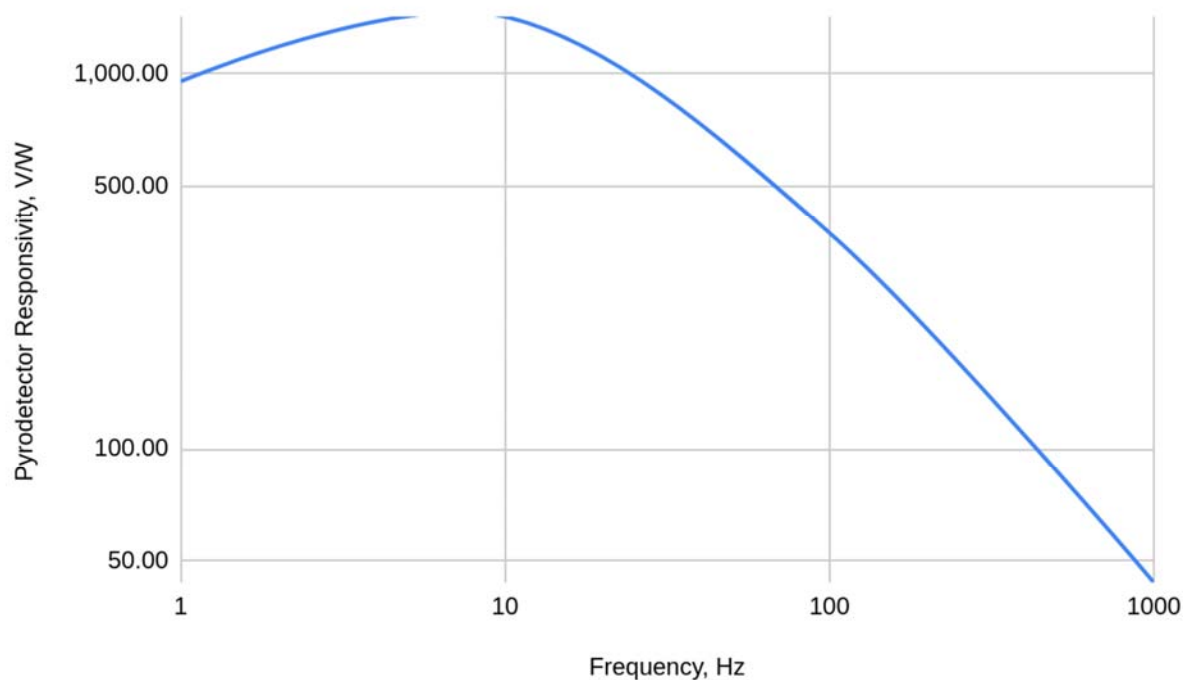


Рис. 3.9 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М406МВН виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.10 Піроелектричний детектор М407

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.51)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.1 \text{ Гц}} = 1.59 \text{ с} \quad (3.52)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.53)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.54)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_P = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{\text{Ам}^2}{d\text{м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 20.8 \text{ пФ} \quad (3.55)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 6.5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 25912 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \quad (3.56)$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Дані М407.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	4,434.12
10	1,362.13
100	159.94
1000	16.27

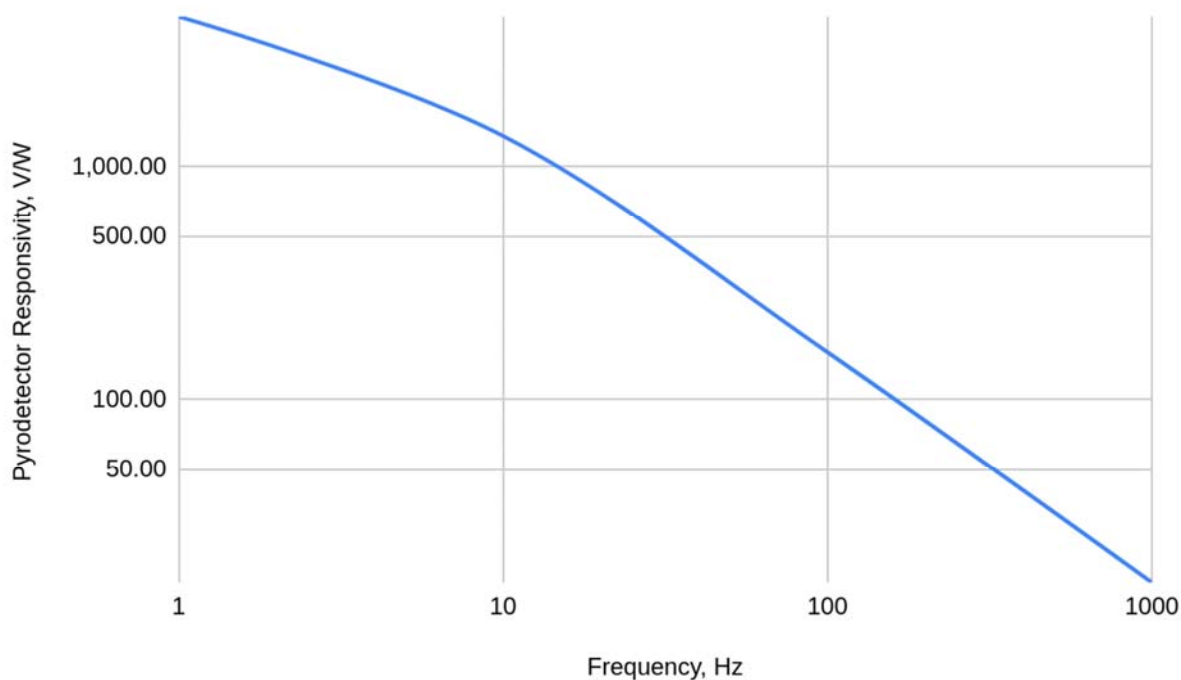


Рис. 3.10 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М407 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.11 Піроелектричний детектор М407М24

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.57)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.1 \text{ Гц}} = 1.59 \text{ с} \quad (3.58)$$

Розміри чутливого елемента складають 2.5 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 2.5 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.59)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.60)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_P = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 52 \text{ пФ} \quad (3.61)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 1.6 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 6378 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \quad (3.62)$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Дані М407М24.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	1,091.42
10	335.28
100	39.37
1000	4.00

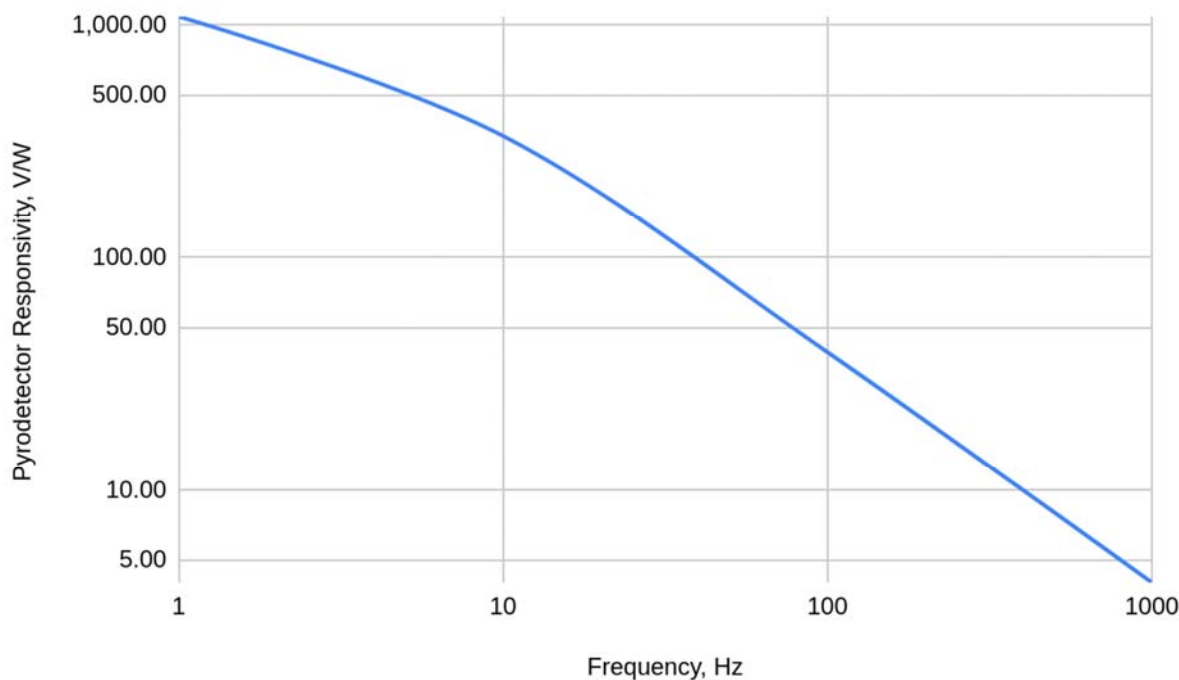


Рис. 3.11 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M407M24 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.12 Піроелектричний детектор M407M56

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.63)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.64)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.65)$$

$$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{\text{Ам}^2}{d\text{м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 20.8 \text{ пФ} \quad (3.66)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\begin{aligned} \tau_E &= (2 \cdot C_p \text{ пФ} + C_{JFET} \text{ пФ}) R_E \Omega = \\ &= (2 \cdot 20.8 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 65 \text{ Г}\Omega = 2.9 \text{ с} \end{aligned} \quad (3.67)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$\begin{aligned} R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} &= \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \\ &= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 6.5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ &= 22025 \frac{\text{В}}{\text{Вт}} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Дані M407M56

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	2,502.98
10	652.23
100	74.75
1000	7.58

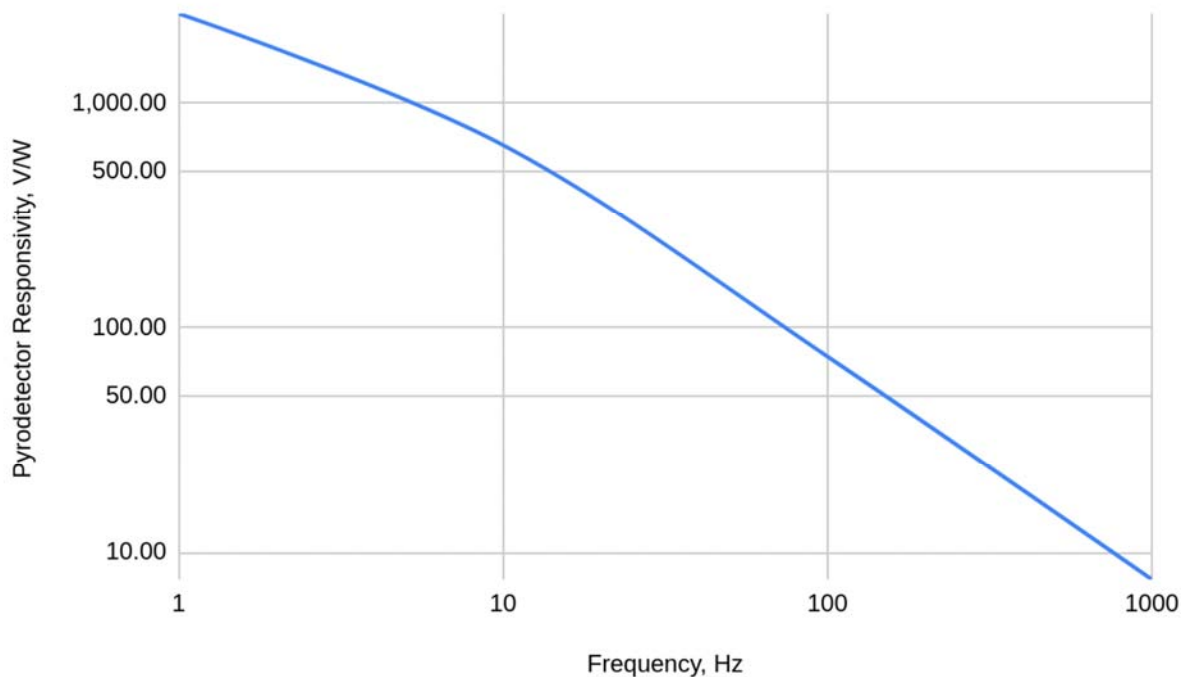


Рис. 3.12 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М407М56 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.13 Піроелектричний детектор М429

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.69)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.1 \text{ Гц}} = 1.59 \text{ с} \quad (3.70)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$A = 1\text{мм} \cdot 2.5\text{мм} = 2.5 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$	(3.71)
---	--------

Теплоємність чутливого елементу дорівнює

$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{м}^2 \times$ $\times 5 \cdot 10^{-5}\text{м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	(3.72)
--	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{11}\Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.73)
--	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Дані М429.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	5,798.48
10	1,781.25
100	209.15
1000	21.27

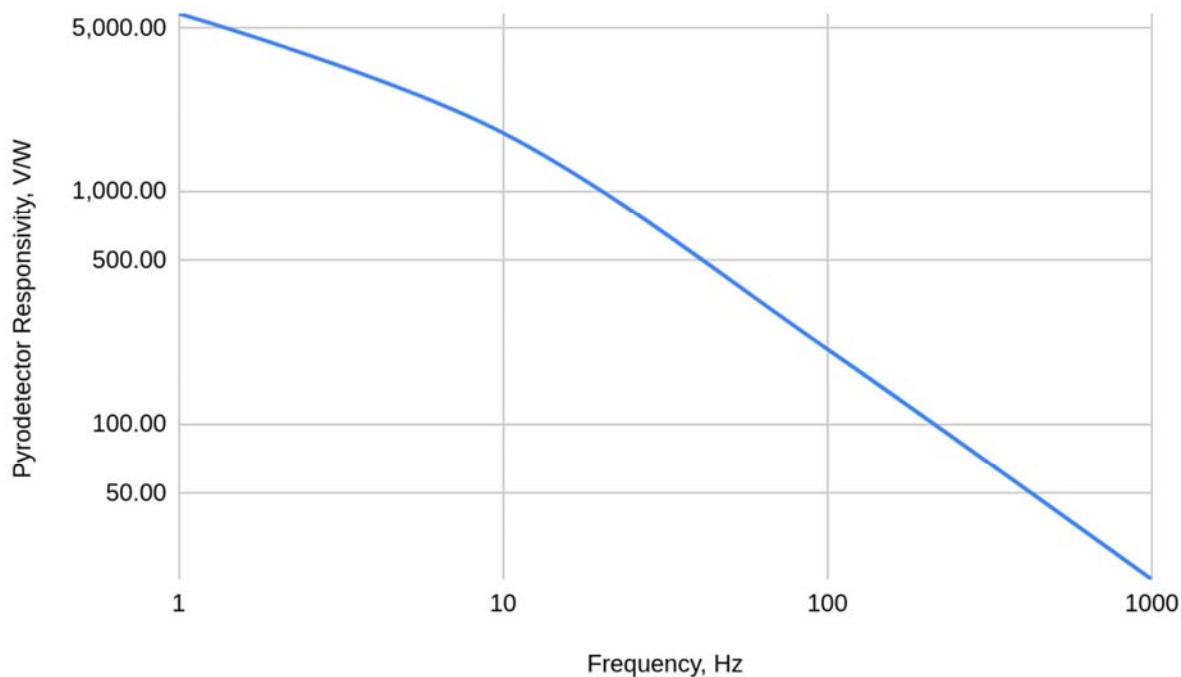


Рис. 3.13 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М429 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.14 Піроелектричний детектор М441

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.74)$$

Розміри чутливого елемента складають 2.5 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 2.5 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.75)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.76)$$

$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	
---	--

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \varepsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 52 \text{ пФ}$	(3.77)
--	--------

Електрична стала часу дорівнює

$\tau_E = C_{shunt} \text{ пФ} R_E \Omega =$ $= 0.1 \text{ пФ} \cdot 100 \text{ Г}\Omega = 0.01 \text{ с}$	(3.78)
---	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 6.25 \cdot 10^{-6} 6.5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.001 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.79)
---	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Дані М441.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	14,869.38
10	27,366.54
100	16,732.30
1000	3,076.59

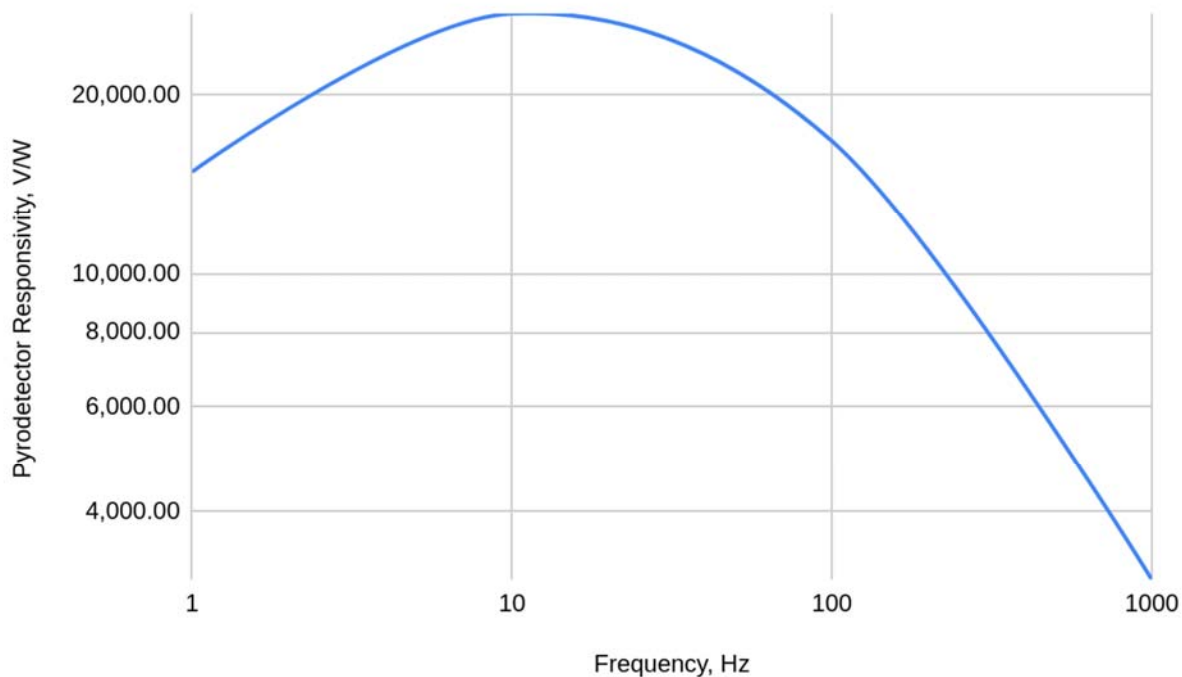


Рис. 3.14

## 3.3.15 Піроелектричний детектор M442

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.80)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.81)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.82)$$

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$C_p = \varepsilon_0 \frac{\Phi}{M} \varepsilon \frac{AM^2}{dM} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M} \cdot 47 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{-6} M^2}{5 \cdot 10^{-5} M} = 52 \text{ пФ}$	(3.83)
---	--------

Електрична стала часу дорівнює

$\tau_E = C_{shunt} \text{пФ} R_E \Omega =$ $= 0.1 \text{ пФ} \cdot 100 \text{ Г}\Omega = 0.01 \text{ с}$	(3.84)
---	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{B}{B_T}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu C}{M^2 K} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.85)
---	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Дані М442.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	14,869.38
10	27,366.54
100	16,732.30
1000	3,076.59

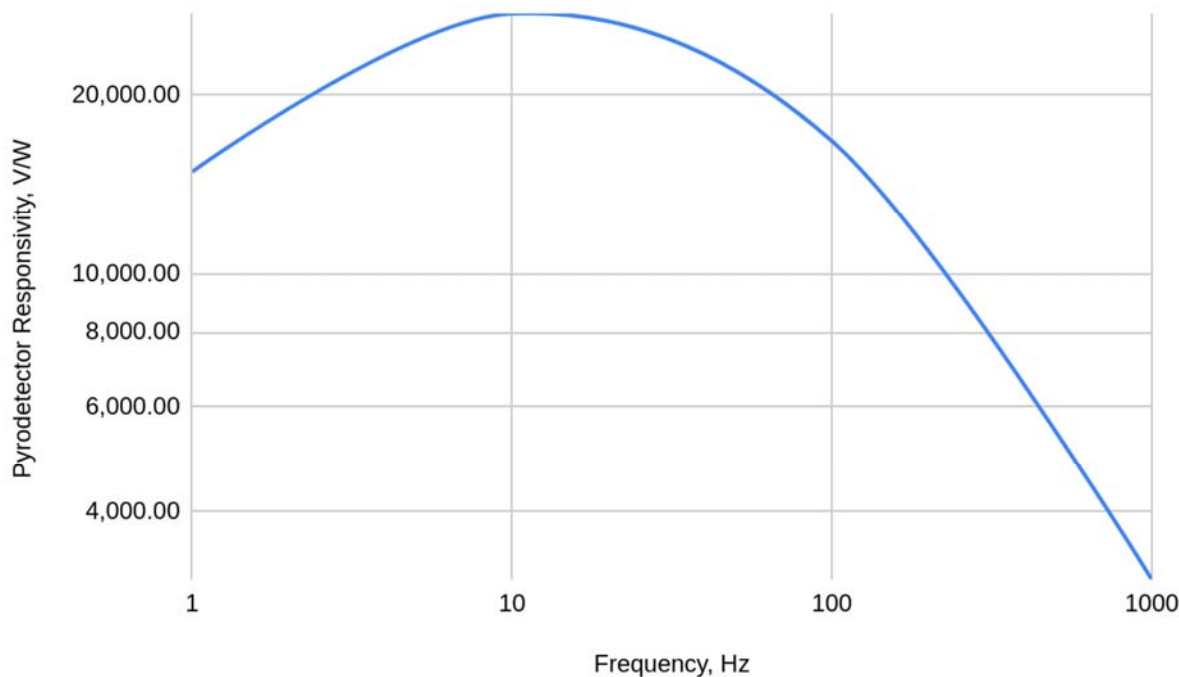


Рис. 3.15 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М442 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.16 Піроелектричний детектор М446/М446М11

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.86)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.87)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.88)$$

$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	
--	--

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$C_p = \epsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \epsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 52 \text{ пФ}$	(3.89)
---	--------

Електрична стала часу дорівнює

$\tau_E = C_{shunt} \text{ пФ } R_E \Omega =$ $= 0.1 \text{ пФ} \cdot 100 \text{ Г}\Omega = 0.01 \text{ с}$	(3.90)
--	--------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \epsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.91)
--	--------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Дані М.446/М446М1.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	14,869.38
10	27,366.54
100	16,732.30
1000	3,076.59

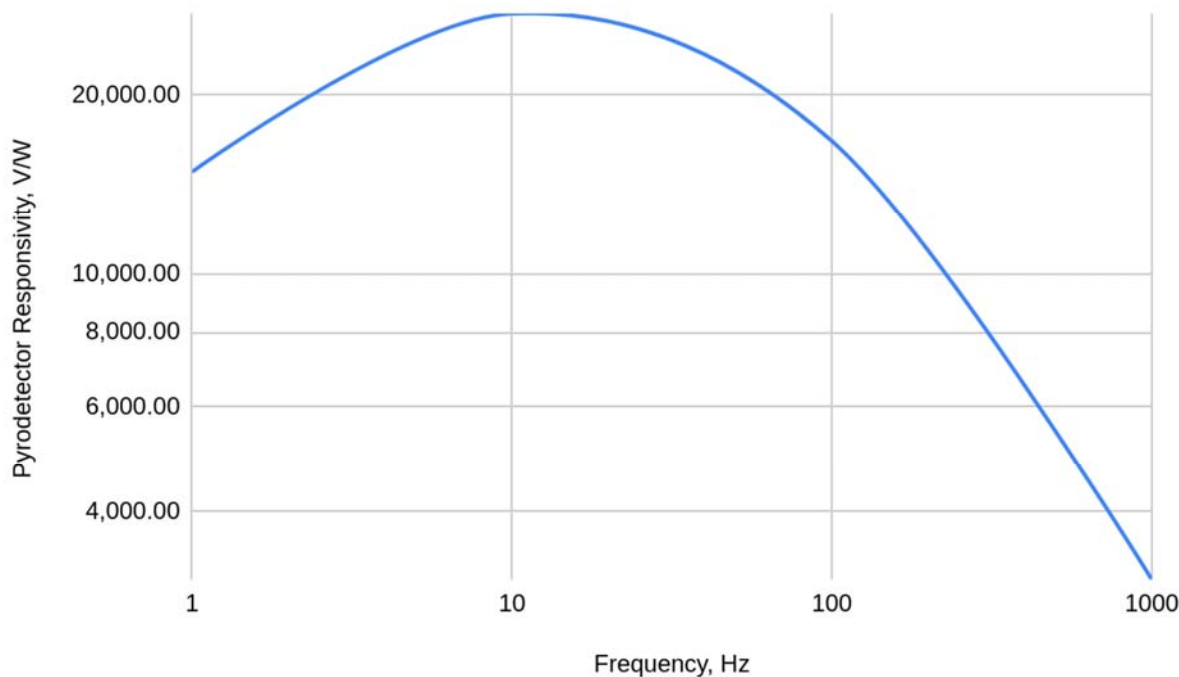


Рис. 3.16 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М446/М446М1 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.17 Піроелектричний детектор М459

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.92)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.19 \text{ Гц}} = 0.838 \text{ с} \quad (3.93)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.94)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SPAd} = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times$$

$$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.95)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.96)$$

$$= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 4 \cdot 10^{-6} 65 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$$

$$= 22025 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Дані М459.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	4,662.95
10	2,029.48
100	255.71
1000	26.21

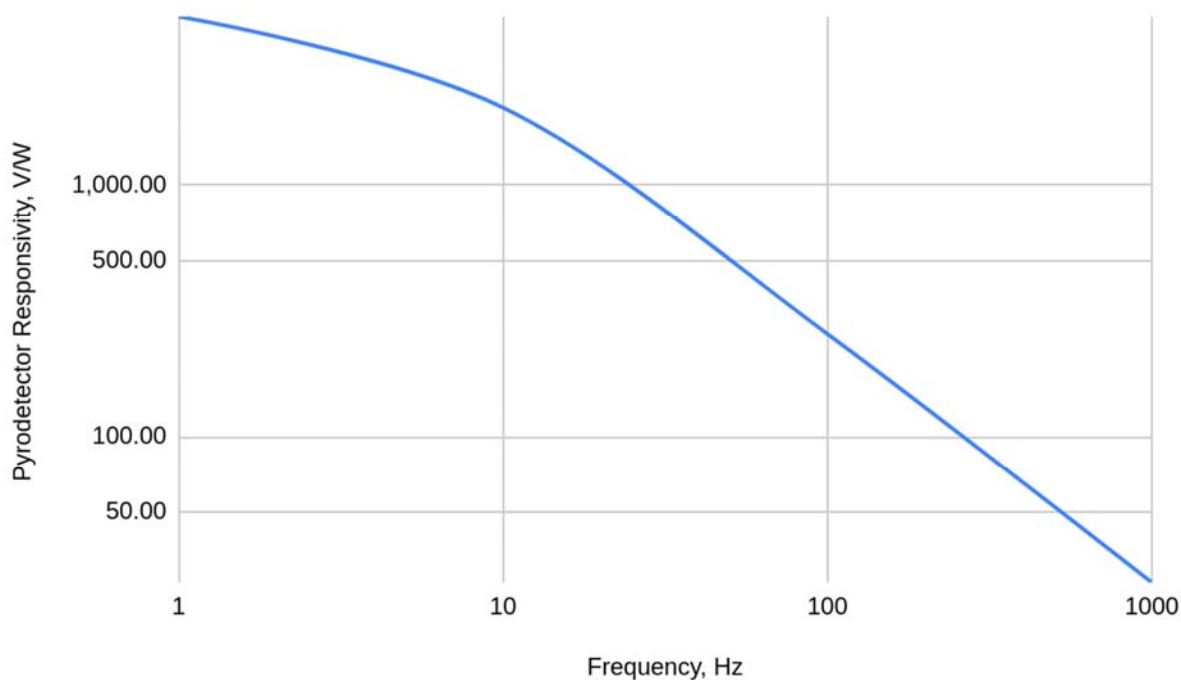


Рис. 3.17 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М459 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.18 Піроелектричний детектор М479

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.97)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.19 \text{ Гц}} = 0.838 \text{ с} \quad (3.98)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.99)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.100)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.101) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 4 \cdot 10^{-6} 20 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 6777 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Дані М479.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	1,434.77
10	624.46
100	78.68
1000	8.06

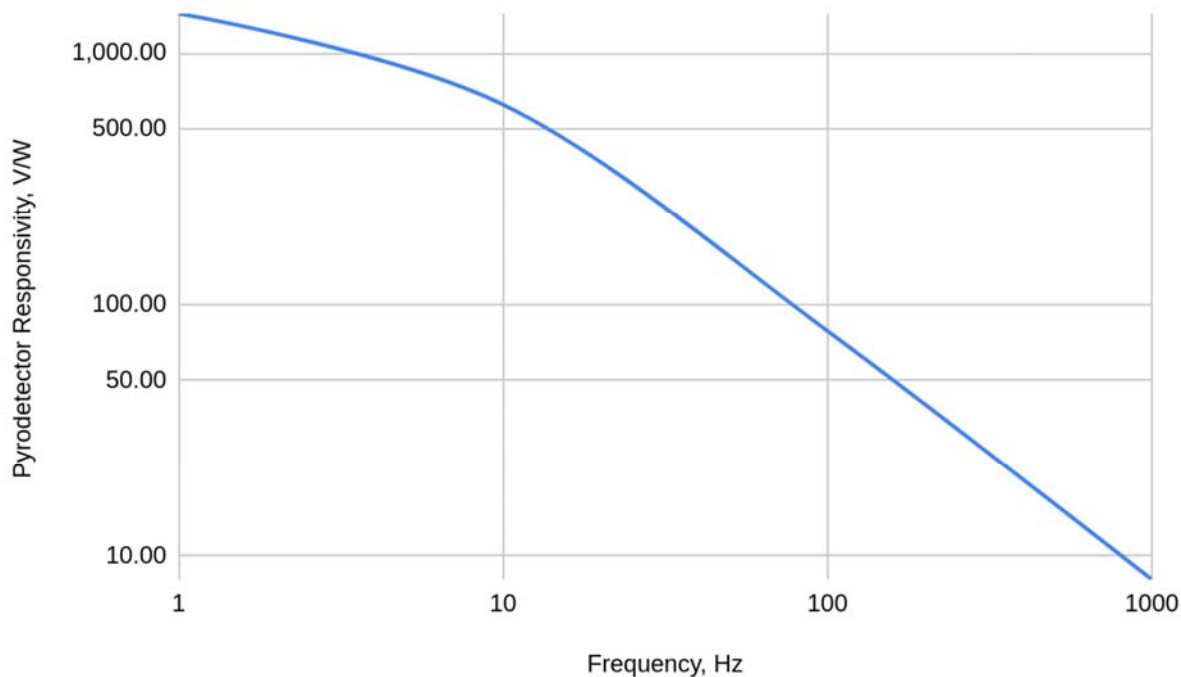


Рис. 3.18 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М479 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.19 Піроелектричний детектор М479М1

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.102)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.19 \text{ Гц}} = 0.838 \text{ с} \quad (3.103)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.104)$$

Теплоємність чутливого елементу дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.105)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.106) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 16942 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 2.1.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.21.

Таблиця 3.21 – Дані М479М1.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	3,586.82
10	1,561.11
100	196.70
1000	20.16

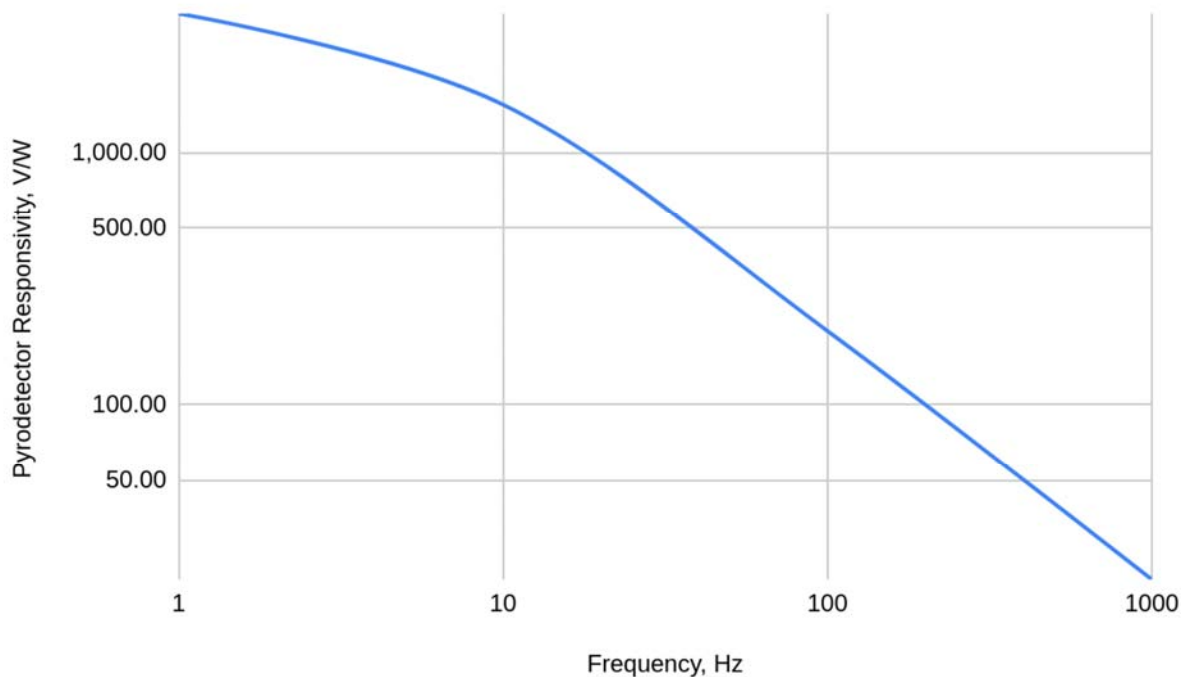


Рис. 3.19 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M479M1 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.20 Піроелектричний детектор M481

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.25 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.107)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.12 \text{ Гц}} = 0.838 \text{ с} \quad (3.108)$$

Розміри чутливого елемента складають 1.5 мм × 1.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1.5 \text{ мм} \cdot 1.5 \text{ мм} = 2.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.109)$$

Теплоємність чутливого елементу дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.110)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.111) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.25 \cdot 10^{-6} 65 \cdot 10^9 \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 22025 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Дані М481.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	4,662.95
10	2,029.48
100	255.71
1000	26.21

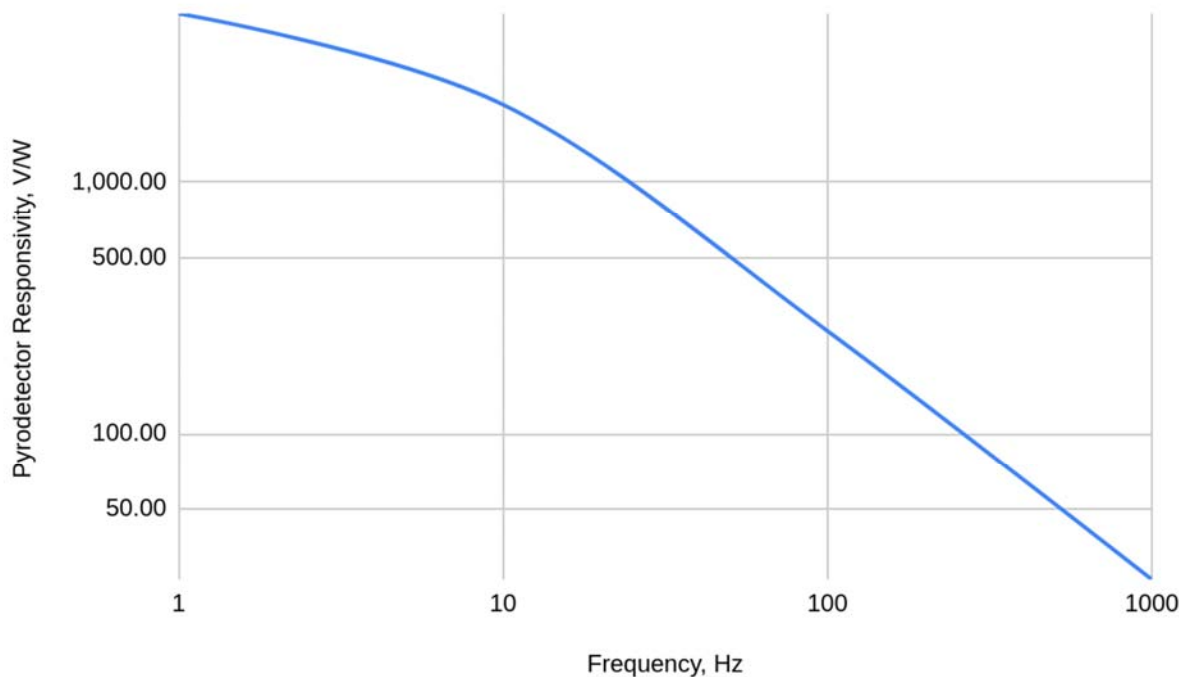


Рис. 3.20 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М481 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.21 Піроелектричний детектор М482

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.796 \text{ с} \quad (3.112)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 1.9 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 1.9 \text{ мм} = 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.113)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP} A d = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \cdot 1.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \quad (3.114)$$

$\times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0003 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	
--	--

Електрична ємність чутливого елемента дорівнює

$C_p = \epsilon_0 \frac{\Phi}{\text{м}} \epsilon \frac{A \text{ м}^2}{d \text{ м}} = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}} \cdot 47 \cdot \frac{3.1416 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{5 \cdot 10^{-5} \text{ м}} = 16 \text{ пФ}$	(3.115)
--	---------

Електрична стала часу дорівнює

$\tau_E = (2 \cdot C_p \text{ пФ} + C_{JFET} \text{ пФ}) R_E \Omega =$ $= (2 \cdot 52 \text{ пФ} + 3 \text{ пФ}) \cdot 100 \text{ Г}\Omega = 3.463 \text{ с}$	(3.116)
--	---------

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{p A R_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \epsilon_W}{C_T}$ $= \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2 \text{К}} 1.9 \cdot 10^{-6} 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0003 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}}$ $= 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$	(3.117)
---	---------

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Дані M482.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	3,365.02
10	844.88
100	96.36
1000	9.77

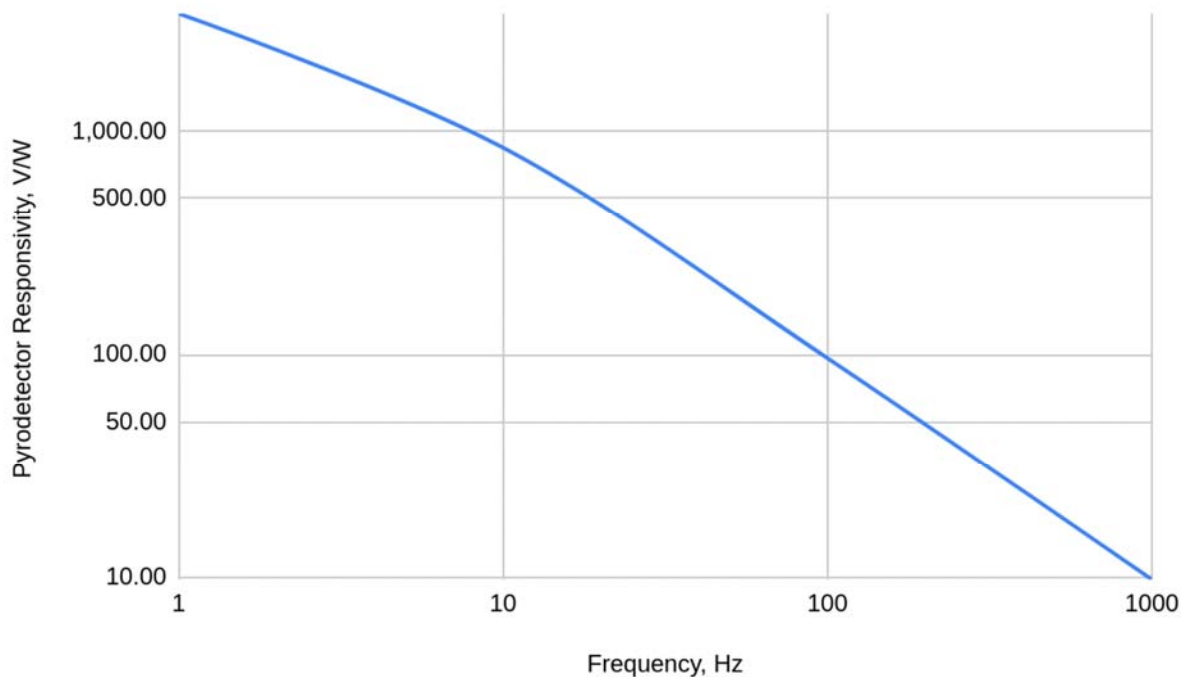


Рис. 3.21 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора М482 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.3.22 Піроелектричний детектор М5192

Теплова стала часу дорівнює

$$\tau_T = \frac{1}{2\pi f_T} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.2 \text{ Гц}} = 0.637 \text{ с} \quad (3.118)$$

Електрична стала часу дорівнює

$$\tau_E = \frac{1}{2\pi f_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 0.105 \text{ Гц}} = 0.838 \text{ с} \quad (3.119)$$

Розміри чутливого елемента складають 1 мм × 2.5 мм. Отже площа становить

$$A = 1 \text{ мм} \cdot 2.5 \text{ мм} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (3.120)$$

Теплоємність чутливого елемента дорівнює

$$C_T = C_{T,SP}Ad = 3.2 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{К}} \cdot 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \times \\ \times 5 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \quad (3.121)$$

Теоретична статична чутливість піродетектору дорівнює

$$R_{\frac{\text{В}}{\text{Вт}}} = \frac{pAR_E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon_W}{C_T} \quad (3.122) \\ = \frac{170 \frac{\mu\text{С}}{\text{м}^2\text{К}} 2.5 \cdot 10^{-6} 1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot 0.7 \cdot 0.67 \cdot 0.8}{0.0004 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \\ = 33885 \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$$

Оскільки тестування піродетекторів є частотно-залежним, ми ігноруємо сталу частину вихідної напруги та обмежуємось лише її змінною частиною. Отримані результати розрахунків підставимо в рівняння 3.5 та отримаємо дані для побудови амплітудно-частотної характеристики, представлені в таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Дані М5192.

Частота, Гц	Чутливість, В/Вт
1	7,173.86
10	3,122.31
100	393.41
1000	40.32

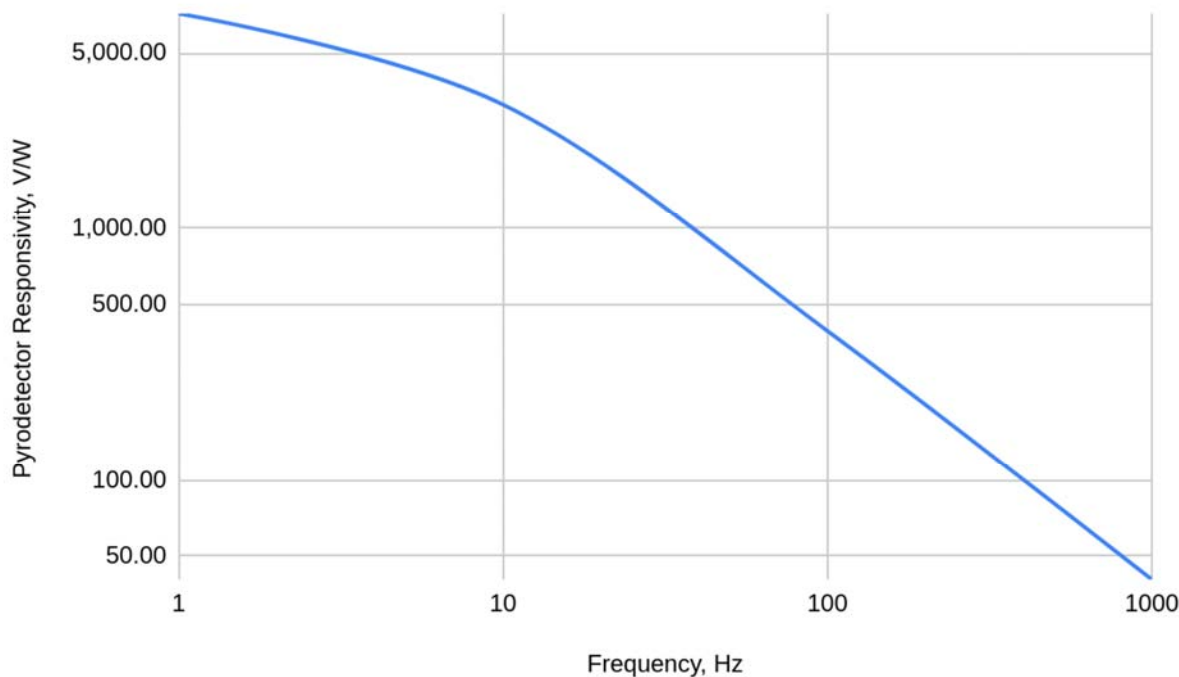


Рис. 3.22 – Амплітудно-частотна характеристика (обчислена) піродетектора M5192 виробництва Eltec Instruments, Inc.

### 3.4 Моделювання піродетектора в середовищі Electronic Workbench

Математичне моделювання піродетекторів в середовищах типу симулятори електронних схем відоме вже кілька десятиліть, але справжня еквівалентна схема піродетектора еквівалентна полосовому фільтру була вперше дана О. Бондаренко лише у 2018 [13], а о 2022 ним же було показано можливість створення розширених специфікацій для піродетекторів [39]. Згідно з [39], О. Бондаренко використовував комерційний симулятор електричних схем TINA-TI, який є сучасним аналогом Electronic Workbench, але від іншого виробника.

Electronic Workbench розроблявся більш чверті століття тому. На свій час це був популярний пакет і скоріше за все не існувало альтернатив. Але сьогодні існують деякі складнощі із запуском цього симулятора під сучасними версіями системи MS Windows. Була зроблена спроба запуснути Electronic Workbench в середовищі Linux через симулятор Wine, але він при зміні коефіцієнту передачі видає або однакові результати, або випадкові, що не можна дослідити правильність роботи програмного продукту в цьому середовищі. Еквівалентна електрична схема в середовищі Electronic Workbench представлена на рис. 3.23 та амплітудно-частотна характеристика на рис. 3.24.

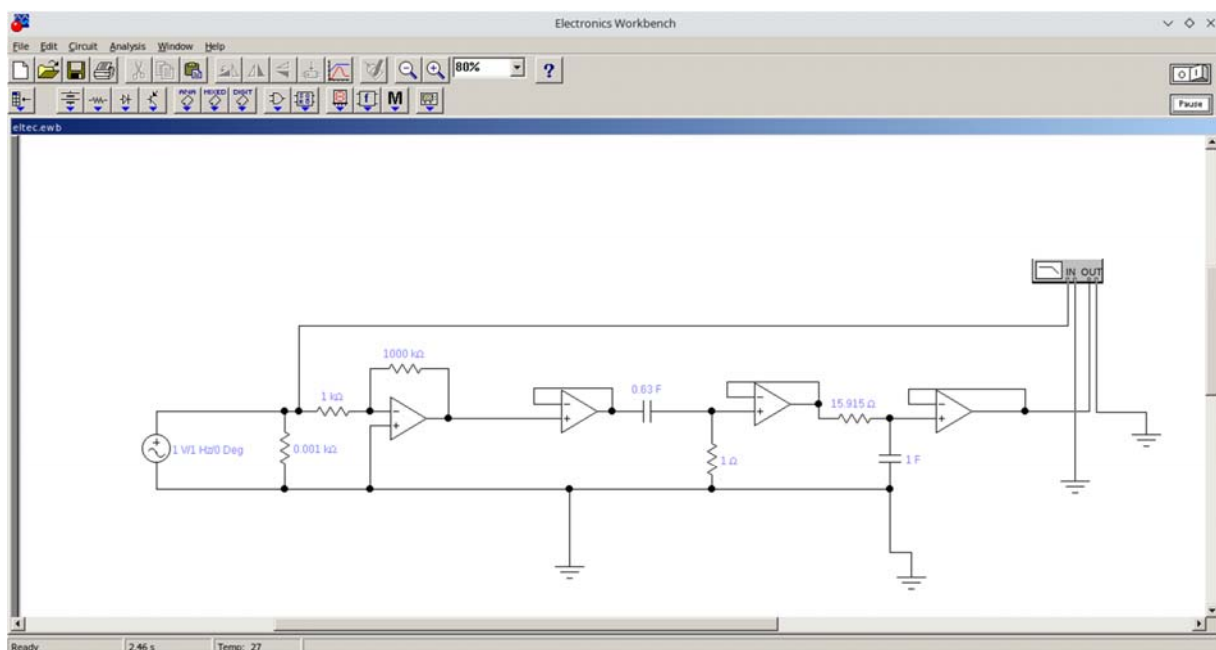


Рис. 3.23 – Спрощена еквівалентна електрична схема піродетектора [13].

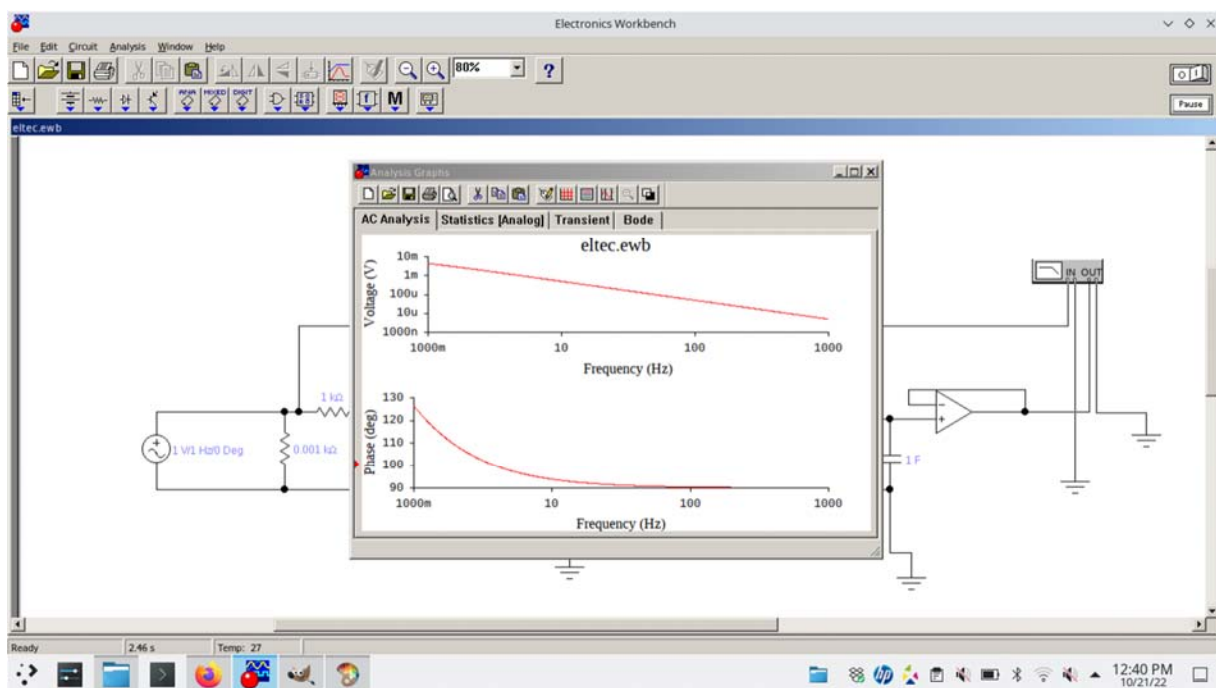


Рис. 3.24 – Амплітудно-частотна характеристика піродетектора.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі проведено аналіз піродетекторів компанії Eltec Instruments, Inc.

В першому розділі представлено огляд ринку піродетекторів, розглянуто їх історію та приведені деякі галузі застосування, проведено аналіз існуючих піродетекторів та обран виробник, який має найбільш документовану продукцію.

В другому розділі розглянуті деякі математичні рівняння різних стадій перетворення теплової енергії в електричну. На основі експериментальних даних від виробника побудовані графіки чутливостей деяких комерційно доступних піродетекторів та графік їх відхилень.

В третьому розділі виконані розрахунки чутливостей та сталих часу для двадцяти двох піродетекторів, представлені розраховані дані чутливостей та побудовані відповідні графіки.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. J . Cooper, “A Fast-Response Pyroelectric Thermal Detector,” *Journal of Scientific Instruments* 39, 467–72, 1962.
2. J . Cooper, “Minimum Detectable Power of a Pyroelectric Thermal Receiver,” *Review of Scientific Instruments* 33, 92–95, 1962.
3. H . P . Beerman, “Pyroelectric Infrared Radiation Detector,” *American Ceramic Society Bulletin* 46, 737, 1967.
4. E . H . Putley, “The Pyroelectric Detector,” in *Semiconductors and Semimetals*, Vol . 5, eds . R . K . Willardson and A . C . Beer, 259–85, Academic Press, New York, 1970.
5. E . H . Putley, “Thermal Detectors,” in *Optical and Infrared Detectors*, ed . R . J . Keyes, 71–100, Springer, Berlin, 1977.
6. S . G . Porter, “A Brief Guide to Pyroelectric Detectors,” *Ferroelectrics* 33, 193–206, 1981.
7. P. Capper, C.T. Elliott, “Infrared Detectors and Emitters: Materials and Devices”, Springer New York, NY, 2001, 478p.
8. A. Rogalski, “Infrared Detectors”, Taylor and Francis Group, LLC, 2009, 900p.
9. A. Rogalski, “Infrared and Terahertz Detectors”, Taylor and Francis Group, LLC, 2019, 1067p.
10. M. Schossig, “Ultradünne, freitragende Lithiumtantalat-Elemente für hochdetektive Infrarotsensoren” / Dissertation, TU-Dresden verlag, 2012, 164 s.

- 11.Y. Querner, “Empfindlichkeitssteigerung bei pyroelektrischen Infrarotsensoren durch interne thermische Verstärkung” / Dissertation, TU-Dresden verlag, 2012, 172 s.
- 12.S. Efthymiou, “Modelling of Pyroelectric Detectors Detection by Digital Signal Processing Algorithms” / Dissertation, The University of Manchester, 2012, 152 p.
- 13.A. Bondarenko, “Mathematical Modeling of a Pyroelectric Detector”, Monograf, 2018, 139 p.  
<https://books.google.com.ua/books?id=lS5qDwAAQBAJ&pg=PA7&dq=pyroelectric&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiIhJaKg6rhAhUsMuwKHY1GAXAQ6AEILTAB#v=onepage&q=pyroelectric&f=false>
14. A. Bondarenko, “The World's First Achievement: The Art of Professional Mathematical Approximation of a Pyroelectric Detector”, Monograf, 2020, 44 p.  
[https://books.google.com.ua/books?id=TdMHEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=TdMHEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- 15.Y . Ta, “Action of Radiations on Pyroelectric Crystals,” Comptes Rendus 207, 1042–44, 1938.
16. Патент США 4,218,620
17. Eltec Instruments, Inc., Datanote 103  
[https://www.silverlight.ch/pdf/eltec\\_data\\_103.pdf](https://www.silverlight.ch/pdf/eltec_data_103.pdf)
- 18.Hans J. Keller, “30 Years of Passive Infrared Motion Detectors - a Technology Review”, 2000  
[https://kub.ch/wp-content/uploads/documents/kube\\_irs2paper.pdf](https://kub.ch/wp-content/uploads/documents/kube_irs2paper.pdf)
- 19.Ian Moir, Allan G. Seabridge, “Military Avionics Systems”, John Wiley & Sons Ltd, 2006, 539 p.
- 20.О. Бондаренко. Приватні консультації.

21. Л.С. Кременчугский “Сегнетоэлектрические приемники излучения”, К., Наукова думка, 1971.
22. Eltec Instruments, Inc. Datanote 125.  
[https://www.silverlight.ch/pdf/eltec\\_data\\_125.pdf](https://www.silverlight.ch/pdf/eltec_data_125.pdf)
23. Jain, Y. K., Kalakrishnan, B., “Use Of Pyroelectric Detectors In Horizon Sensors”, Optical Engineering, Volume 18, Issue 6, pp. 634 (1979).
24. George R. Rullman, S. Baliga, Alan P. Doctor, “Space-qualified pyroelectric detectors”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2215, 1994.
25. Kunio Nakamura, Takeo Ishigaki, Akira Kaneko, Shozo Takahashi, Jun Nishida, Yasufumi Wakabayashi & Hiroyuki Nakamura, “Pyroelectric infrared detector for precision earth sensor”, International Journal of Infrared and Millimeter Waves volume 10, pages 907–930, 1989.
26. Пат. США US5744801A.
27. Криксунов, Л.З., под ред., “Авиационные системы оптического диапазона”, М.:Машиностроение, 1985, 264 с.
28. Приклади застосування інфрачервоних випромінювачів  
<https://www.axetris.com/de/irs/medizin>
29. О. Бондаренко, “Защита банкоматов от взрывов”, Бизнес та безпека, №4/2020 (138), с.51—54.
30. DIAS Infrared, GmbH. Documentation. dias-infrared.de
31. InfraTec, GmbH. Documentation. infratec.de
32. Heimann Sensor GmbH. Documentation. heimannsensor.de
33. Закон США S.3522 про ленд-ліз для оборони демократії Україною від 09 травня 2022 року // Ukraine Democracy Defense Lend-Lease Act of May, 09, 2022, S.3522.  
<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/3522>

34. І. Ключник. Дисертація, 1987.
35. J. Fraden, “Handbook of Modern Sensors”, 5th Edition, Springer Cham, 2016, 758 p.
36. Eltec Instruments, Inc. Datanote 121.  
[https://www.silverlight.ch/pdf/eltec\\_data\\_121.pdf](https://www.silverlight.ch/pdf/eltec_data_121.pdf)
37. А. Bondarenko, “Examples of Extended Pyroelectric Detector Specifications for Advanced Engineers”, Google Books, 58 p.  
[https://books.google.com.ua/books?id=YApZEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=YApZEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
38. Н. Budzier, G. Gerlach, “Thermal Infrared Sensors”, Wiley, 2011.
39. А. Bondarenko, “Examples of Extended Pyroelectric Detector Specifications for Advanced Engineers”, Google Books, 2022, 58p.  
[https://books.google.com.ua/books?id=YApZEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=YApZEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)