

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему

Створення зовнішнього обчислювального модуля для стенду  
дослідження схем на операційних підсилювачах

Студент 152, МТ-41 Палійчук М.І  
(шифр, група, прізвище та ініціали)

Керівник БКР Паракуда В.В /\_\_\_\_\_/

Консультанти Рачинська Г.В /\_\_\_\_\_/

Кочан О.В /\_\_\_\_\_/

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ /д.т.н. проф. Бубела Т.З/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

Національний університет «Львівська політехніка»

(назва вищого навчального закладу)

Інститут ІКТА Кафедра ІВТ

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ІВТ

Т.З.Бубела

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

### **ЗАВДАННЯ**

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студентів

Палійчук Мар'ян Ігорович

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема БКР Створення зовнішнього обчислювального модуля для стенду дослідження схем на операційних підсилювачах  
затверджена наказом по університету від 8 квітня 2025 р. № 1282-4-08
2. Термін подання студентом закінченого проекту 16 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проекту: аналіз технічної та навчально-методичної бази стенду ОРАМР-3.1, дослідження існуючих комерційних навчальних наборів для вивчення операційних підсилювачів, метод порівняльного аналізу функціональності аналогових рішень, специфікації мікроконтролера Arduino NANO та сумісних компонентів, використання методу лінійної та множинної регресії для обробки експериментальних даних, Python-аналіз результатів, а також економічні розрахунки ефективності впровадження зовнішнього обчислювального модуля в освітній процес.
4. Зміст розрахунково – пояснювальної записки (перелік питань, що їх треба розробити): Вступ, Розділ 1. Аналіз існуючих рішень для дослідження схем на операційних підсилювачах, Розділ 2. Апаратна реалізація системи, Розділ 3. Експериментальні дослідження, Розділ 4. Економічне обґрунтування проектних рішень, Висновки, Список літератури
5. Перелік графічного матеріалу  
Word, PowerPoint презентація

## 6. Консультування роботи, із зазначенням розділів БКР

Розділ	Консультант	Завдання видав		Завдання прийняв	
		Підпис	Дата	Підпис	Дата
Економічна частина	канд. екон. наук, доц. Рачинська Галина Василівна		07.05.2025		10.06.2025

7. Дата отримання завдання 07.05.2025

Керівник Паракуда В.В.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання Палійчук М.І.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів БКР	Примітки
1	Отримання завдання	02.04.2025	<i>виконано</i>
2	Аналіз існуючих рішень для дослідження схем на операційних підсилювачах	до 16.04.2025	<i>виконано</i>
3	Знайомство з стендом ОРАМР v3.1	до 18.04.2025	<i>виконано</i>
4	Розроблення структури обчислювального	до 24.04.2025	<i>виконано</i>

	апаратного модуля на базі Arduino		
5	Вибір і підключення допоміжних компонентів	до 30.04.2025	<i>виконано</i>
6	Експериментальні дослідження інвертуючого підсилювача	до 18.05.2025	<i>виконано</i>
7	Експериментальні дослідження інвертуючого суматора	до 5.06.2025	<i>виконано</i>
8	Формування висновків, презентації та доповіді	до 9.06.2025	<i>виконано</i>
9	Представлення роботи для перевірки на плагіат	10.06.2025	<i>виконано</i>
10	Представлення роботи до попереднього захисту	16.06.2025	<i>виконано</i>

Студент – дипломник: *Палійчук М.І*

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту: *Паракуда В.В.*

\_\_\_\_\_  
(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Палійчук М.І. Створення зовнішнього обчислювального модуля для стенду дослідження схем на операційних підсилювачах. Бакалаврська кваліфікаційна робота на здобуття ступеня бакалавра за спеціальністю 152 «Метрологія та Інформаційно-Вимірвальна Техніка». – Національний Університет “Львівська Політехніка”, кафедра “Інститут комп’ютерних технологій, автоматики та метрології”. – Львів, 2025. – 62 с., 4 табл., список використаних джерел з 15 джерел, чотири розділи, 14 підрозділів.

Бакалаврська робота присвячена розробці зовнішнього обчислювального модуля для зчитування та обробки даних зі стенду дослідження схем на операційних підсилювачах ОРАМР-3.1. У роботі представлено апаратну реалізацію пристрою на основі мікроконтролера Arduino Nano, що забезпечує дистанційне керування фіксацією експериментальних даних за допомогою інфрачервоного пульта та автоматичне збереження даних у файл формату CSV. Окрему увагу приділено математичній обробці результатів шляхом використання методів регресійного аналізу в середовищі Python. Проведено техніко-економічне обґрунтування розробки, визначено показники якості, економічної ефективності та лімітної ціни нового виробу.

**Ключові слова:** Arduino, ОРАМР-3.1, інфрачервоний пульт, збір даних, регресія, техніко-економічне обґрунтування.

## ABSTRACT

Paliichuk M.I. Development of an external computing module for operational amplifier circuit analysis stand. Bachelor's thesis for obtaining the degree of Bachelor in specialty 152 «Metrology and Information-measuring technology». – “Lviv Polytechnic National University”, Department of “Institute of Computer Technologies, Automation and Metrology”. – Lviv, 2025. – 62 p., 4 tables, a list of 15 sources, four chapters, 14 subchapters.

The bachelor's thesis is devoted to the development of an external computational module designed for capturing and processing data from a research stand for operational amplifier circuits OPAMP-3.1. The work presents a hardware implementation based on the Arduino Nano microcontroller, which allows for remote fixation of experimental data using an infrared remote control and automatic saving to a CSV file. Special attention is paid to data processing using regression analysis methods in Python. A techno-economic justification is provided, along with evaluation of quality indicators, economic efficiency, and the limit price of the new device.

**Key words:** Arduino, OPAMP-3.1, IR remote, data acquisition, regression, techno-economic justification.

ВСТУП .....	9
1.АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ.....	11
1.1 Використання дискретних компонентів.....	12
1.2 Стенд УІЛС-9.....	15
1.3 Стенд ОРАМР-3.1.....	18
1.4 Порівняння блоків.....	26
1.5 Висновки до розділу 1.....	28
2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ.....	29
2.1 Структура апаратної частини обчислювального модуля на базі ARDUINO.....	29
2.2 Вибір і підключення допоміжних компонентів.....	30
2.3 Лінійна регресія .....	32
2.4 Множинна регресія .....	38
2.5 Висновки до розділу 2.....	41
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	46
3.1 Експериментальні дослідження інвертуючого підсилювача.....	47
3.2 Експериментальні дослідження інвертуючого суматора.....	49
3.3 Висновки до розділу 3.....	51
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ.....	51

4.1. Економічна характеристика проектного виробу.....	52
4.2 Визначення комплексного показника якості.....	52
4.3 Розрахунок лімітної ціни нового виробу.....	55
4.4 Визначення показників економічної ефективності проектних рішень.....	57
4.4.1. Економічний ефект у виробництві.....	57
4.4.2. Термін служби за амортизацією.....	59
4.4.3. Річний економічний ефект в експлуатації.....	59
4.4.4. Сумарний ефект за весь строк служби.....	60
4.4.5. Загальний економічний ефект.....	60
4.4.6. Термін окупності.....	61
ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65

## ВСТУП

Сучасна експериментальна електроніка [1], лабораторні дослідження аналогових схем, а також навчальні потреби у закладах вищої освіти все частіше вимагають недорогих, адаптивних рішень для дослідження електронних компонентів, в тому числі операційних підсилювачів. Використання стандартного вимірювального обладнання (осцилографів, аналізаторів сигналу, функціональних генераторів тощо) є ефективним, але часто — дорогим та недоцільним у випадку побудови вузькоспеціалізованих навчальних або дослідницьких стендів [2].

У зв'язку з цим все більшої популярності набуває підхід до створення автономних обчислювальних модулів на основі відкритих апаратно-програмних платформ, зокрема Arduino. Завдяки простоті, доступності та широкому спектру сумісних датчиків, Arduino дозволяє реалізувати системи збору, обробки та передачі даних для потреб наукових або навчальних експериментів у сфері аналогової електроніки.

У даній роботі здійснюється розробка зовнішнього обчислювального модуля на базі Arduino, який призначений для збору даних, аналізу сигналів і проведення вимірювань в рамках експериментального дослідження схем на операційних підсилювачах. В роботі буде обґрунтовано вибір апаратної частини, наведено схему підключення, реалізовано програмне забезпечення та проведено дослідну перевірку роботи створеного модуля.

Актуальність теми полягає у потребі вибору доступного лабораторного стенду, який дозволяє гнучко підходити до дослідження електричних схем без значних фінансових витрат. Такий модуль дає змогу студентам, викладачам та науковцям не лише досліджувати типові схеми на операційних підсилювачах,

а також модифікувати та розширювати функціональність системи під конкретні завдання.

Новизна дослідження полягає у поєднанні відкритої платформи Arduino з методикою дослідження вхідних параметрів електронних схем, що створює універсальний інструмент для проведення лабораторних експериментів з високим ступенем адаптивності та інтерактивності. Запропонований підхід дозволяє реалізувати дешевий, але функціонально потужний стенд, орієнтований на глибоке розуміння принципів роботи операційних підсилювачів у практичних умовах.

## 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Вивчення аналогової схемотехніки на базі операційних підсилювачів є важливою складовою підготовки сучасного фахівця у сфері електроніки та автоматизації. Стандартні лабораторні заняття у закладах освіти часто обмежені за часом, обладнанням або гнучкістю експериментів. У зв'язку з цим постала потреба у створенні зовнішнього обчислювального модуля на базі Arduino, який би дозволяв:

- розширити функціональні можливості існуючих лабораторних стендів;
- реалізовувати складніші вимірювання та обробку сигналів (включаючи цифрову фільтрацію та збереження даних);
- збільшити наочність процесів шляхом інтеграції з графічними інтерфейсами на ПК або мобільних пристроях;
- застосовувати модуль повторно та в різних лабораторних умовах.

Розробка такого модуля дозволяє вийти за межі класичної лабораторної практики й одночасно інтегрувати сучасні цифрові інструменти до навчального процесу. Щоб інтеграція була успішною, потрібно було вибрати стабільну та функціональну апаратну базу для досліджень — зокрема стенд, який буде підтримувати вивчення основних схем на операційних підсилювачах та легко взаємодіяти з Arduino.






## 1.1 Використання дискретних компонентів



Один з найпоширеніших підходів до вивчення аналогових схем — використання дискретних конструкторів та наборів для збирання схем на макетних платах. Прикладом таких рішень є продукція, представлена на сайті [rcscomponents.kiev.ua](http://rcscomponents.kiev.ua), де пропонуються різноманітні електронні конструктори на операційних підсилювачах.

Порівняльний аналіз альтернативних рішень

Серед доступних на сайті наборів, до прикладу:

№	Назва конструктора	Типи схем та тематика	Коментар	Фото
1	Практична електроніка №6 – Операційні підсилювачі	Інверсний/неінверсний підсилювач, суматор, компаратор, сенсори, аудіо-ланцюги	Єдиний конструктор, присвячений саме ОП. Має обмежену кількість фіксованих схем.	
2	Практична електроніка №3 – Напівпровідники	Діоди, транзистори, стабілітрони	Немає жодної схеми на ОП. Більше зосереджено на елементах, а не на функціональних вузлах.	

3	Практична електроніка №1 – Базовий	Резистори, конденсатори, мультиметр	Навчання базовим електричним величинам. Відсутні функціональні схеми на ОП.	
4	Практична електроніка №2 – Перемикачі	DIP-перемикачі, реле, геркони, кнопки	Тема перемикачів, логіка та керування. Не підходить для схемотехніки аналогових підсилювачів.	
5	Практична електроніка №4 – Оптикоелектроніка	Світлодіоди, індикатори, фотодіоди, фоторезистори	Містить базові оптоелементи, відсутні схеми ОП.	
6	Практична електроніка №5 – Джерела живлення	Батареї, акумулятори, альтернативні джерела живлення	Акцент на живленні, а не на підсилювачах.	
7	Practical Electronics For Everybody (Vol.1, матова/глянцева)	Теоретична книга + експерименти з базовими компонентами	Хороша для початківців, однак не спеціалізується на ОП. Мова англійська.	

8	Практична електроніка №7 – Таймер NE555	Метрономи, таймери, бар'єри, IR-проекти	Зосереджені й виключно на мікросхемі NE555. ОП не використовуються.	
9	Практична електроніка №8 – Цифрова електроніка	Логіка: AND, OR, XOR, регістри, тригери	Цифрові схеми, не охоплює аналогові підсилювачі.	

Порівняльна характеристика конструкторів для дослідження операційних підсилювачів(Таблиця 1.1)

Основні недоліки розглянутих конструкторських рішень

Після детального аналізу наборів серії «Практична електроніка» та подібних базових конструкторів, можна виділити кілька спільних обмежень, що роблять їх малоприсадними для систематичного вивчення схем на операційних підсилювачах:

- Обмежена кількість схем — більшість наборів дозволяють зібрати не більше 2–3 типових прикладів (як правило, лише інверсний/неінверсний підсилювач або компаратор).
- Відсутність модульності — немає змоги гнучко змінювати параметри схеми, підключати альтернативні сигнальні джерела чи проводити

експерименти зі змінними номіналами.

- Немає вбудованого живлення — більшість конструкторів потребують окремого джерела  $\pm 12\text{В}$ , що ускладнює використання в умовах навчальної лабораторії.
- Відсутні вимірювальні прилади — всі значення необхідно зчитувати вручну за допомогою мультиметра, що сповільнює процес і підвищує ймовірність помилки.
- Висока складність у підключенні — використання макетних плат або пайки потребує додаткових навичок, підвищує ризик неправильного з'єднання, коротких замикань або пошкодження компонентів.
- Обмежене навчальне застосування — багато наборів орієнтовані на побутові або демонстраційні цілі, а не на систематичне вивчення аналогових електронних схем.

## 1.2 Стенд УІЛС-9

Стенд УІЛС-9 (Універсальний Інтерактивний Лабораторний Стенд версії 9) призначений для проведення лабораторних робіт з основ електроніки та аналогової схемотехніки. Він орієнтований на вивчення дискретних та інтегральних елементів, зокрема транзисторів, логічних елементів, джерел сигналів, аналогових підсилювачів тощо. Стенд має модульну структуру і забезпечує візуальне представлення навчального матеріалу [3].

### Основні характеристики УІЛС 9:

- Живлення: передбачено декілька рівнів постійної напруги (наприклад,  $\pm 5\text{В}$ ,  $\pm 12\text{В}$ ), що дозволяє підключати різні аналогові вузли;
- Експериментальна панель: містить набір типових схем з попередньо змонтованими елементами;
- Комутаторна панель: дозволяє студенту з'єднувати входи/виходи між вузлами схем за допомогою знімних перемичок;
- Вбудовані джерела сигналу: включають генератор імпульсів та синусоїдального сигналу (обмеженої частоти);
- Захист від помилок: маються струмозахисти та світлодіодні індикатори аварійних режимів.

### Переваги УІЛС 9:

- Навчальна універсальність: дає змогу досліджувати як аналогові, так і цифрові схеми;
- Зручність у використанні: панельне компонування дає змогу швидко збирати схеми без пайки;
- Можливість розширення: стенд дозволяє підключати зовнішні модулі та сигнальні джерела;
- Інтерактивність: часто поставляється з навчальною програмою для покрокового виконання експериментів.

### Недоліки у контексті даної роботи:

Попри багатофункціональність, УІЛС 9 має деякі обмеження, які стали критичними при плануванні розробки зовнішнього обчислювального модуля:

1. Відсутність спеціалізації на операційних підсилювачах — УІЛС 9 охоплює широку тематику, але не має акценту на вивченні саме схем на ОП, таких як інтегратор, компаратор, активні фільтри або генератори.
2. Немає точок цифрового зчитування — важко зручно підключити Arduino або інші мікроконтролери без додаткових переходів.
3. Масштабність конструкції — стенд громіздкий, не мобільний, що обмежує його використання в проєктній або дослідницькій роботі за межами аудиторії.
4. Ціна — вартість стенду суттєво перевищує бюджет освітніх ініціатив або автономних обчислювальних модулів для опрацювання результатів вимірювання.

Стенд УІЛС 9 добре підходить для базового вивчення електроніки у навчальному процесі, проте його загальна спрямованість не дозволяє ефективно використовувати його як платформу для дослідження схем на операційних підсилювачах з подальшою цифровою обробкою результатів. Саме тому для реалізації цілей зовнішнього обчислювального модуля на базі Arduino для стенду дослідження схем на операційних підсилювачах найкращим виявився вибір спеціалізованого стенду ОРМР 3.1, який є вузькопрофільним, оптимізованим для роботи з ОП, і більш сумісним з Arduino-платформами.

### 1.3 Стенд ОРАМР-3.1

Для забезпечення практичного вивчення електронних схем на операційних підсилювачах (ОП), широке застосування знайшли універсальні навчальні лабораторні стенди. Одним із найбільш популярних серед них є стенд ОРАМР, що виготовляється ПМП "OPEN SYSTEM" у м. Хмельницький. Даний стенд забезпечує комплексну платформу для експериментального дослідження схемотехніки аналогових пристроїв.

Загальний опис конструкції

Стенд ОРАМР 3.1 побудований таким чином, щоб надати студентам повний набір функціональних можливостей для вивчення базових та розширених схем на ОП. Його конструкція включає в себе:

- блок живлення;
- набір функціональних схем;
- вбудовані контрольно-вимірювальні пристрої;
- внутрішнє комутаційне поле;
- набір роз'ємів для під'єднання зовнішнього вимірювального обладнання.

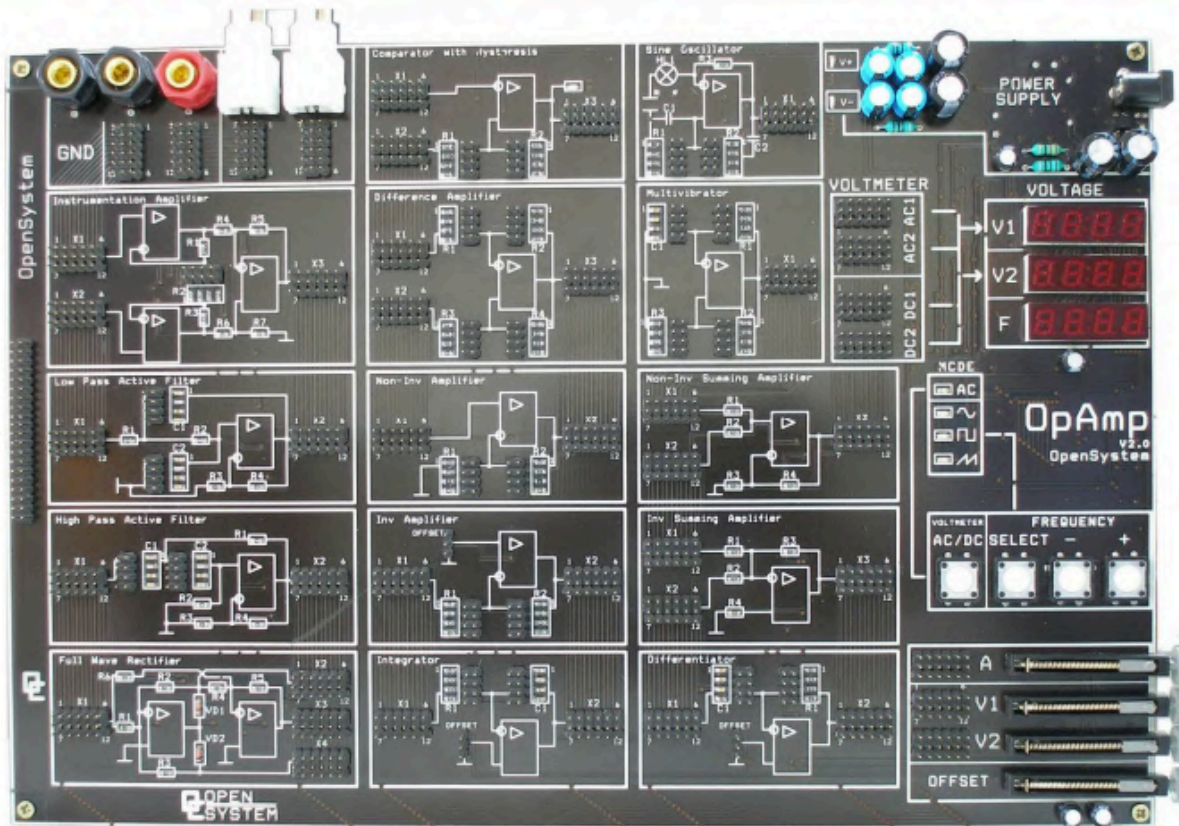


Рис. 1.1 Зовнішній вигляд лабораторного стенду OpAmp

На передній панелі розташовано функціональні блоки, призначені для вивчення певних схем. Назви схем зазначено англійською мовою, що полегшує ознайомлення з іноземною технічною літературою. Кожна функціональна схема візуально відокремлена білим контуром, що спрощує орієнтацію на панелі.

### Технічні характеристики стенду

Стенд OPAMP 3.1 містить інтегрований генератор сигналів із широким діапазоном частот (від 1 Гц до 100 кГц), що дозволяє створювати сигнали різної форми — синусоїдальні, прямокутні та трикутні.

<b>Параметр</b>	<b>Значення</b>
<b>Внутрішній генератор</b>	
Діапазон частот	1Гц - 100кГц
Форма вихідного сигналу	синусоїдальна, прямокутна, трикутна.
крок вибору частоти	
в діапазоні частот 1-100Гц	1Гц
в діапазоні частот 100-1кГц	10Гц
в діапазоні частот 1кГц-10кГц	100Гц
в діапазоні частот 10кГц-100кГц	1кГц
вихідна напруга (амплітудне значення)	
синусоїдальна	0 - 5В
Прямокутна	0 - 5В
трикутна	0 - 5В
<b>Внутрішні джерела напруги (V1,V2)</b>	
вихідна напруга	-10В - +10В
вихідний струм, не більше	20mA
діапазон підстройки напруги зміщення	-50mВ - +50mВ
<b>Вольтметр постійної напруги</b>	

діапазон вхідної напруги	-12В - +12В
похибка вимірювання, не більше	2.5%
<b>Вольтметр змінної напруги</b>	
діапазон вхідної напруги	0-12В
похибка вимірювання, не більше	5%
<b>Напруга живлення</b>	
постійна	12В ±10%
змінна	12В ±10%
струм споживання, не більше	0.5А

Продовження таблиці 1.1

Напруга живлення операційних підсилювачів досліджуваних схем	±12В
Максимальний вихідний струм кожної з досліджуваних схем	20мА
Габаритні розміри	315x215x25мм

Технічні характеристики стенду (Таблиця 1.1)

Крім генератора, в конструкцію стенду входять два вольтметри для вимірювання постійної та змінної напруги, джерела живлення для

досліджуваних схем ( $\pm 12$  В), а також змінні джерела напруги для встановлення зміщення в межах від -50 мВ до +50 мВ.

### **Перелік функціональних схем**

Стенд ОРАМР дозволяє вивчати такі функціональні вузли на базі операційних підсилювачів:

- інверсний та неінверсний підсилювачі;
- інверсний та неінверсний суматори;
- диференційний та інструментальний підсилювачі;
- інтегратор та диференціатор;
- фільтри низьких та високих частот;
- мультівібратор;
- генератор синусоїдальних коливань;
- випрямляч середніх значень;
- компаратор.



Рис. 1.2 Функціональні схеми стенду

Усі схеми розміщено на загальному полі та оснащено відповідними роз'ємами для підключення зовнішніх і внутрішніх сигналів. Присутній набір елементів (резисторів, конденсаторів), які можуть змінюватися в залежності від варіанта дослідження [4, 5].

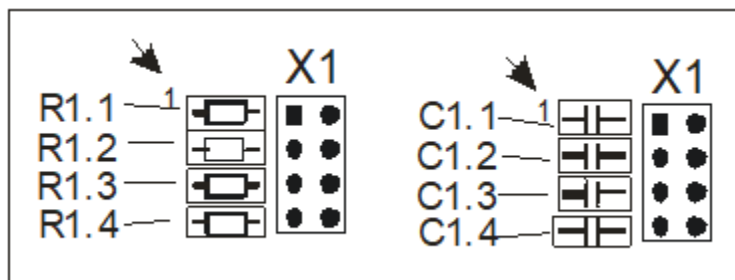


Рис. 1.3 Набірне поле вибору номіналів резисторів та конденсаторів

## Контрольно-вимірвальні пристрої та комутація

На правій частині панелі стенду розташовані вимірвальні та регулюючі компоненти. Вони включають:

- два цифрових вольтметри;
- частотомір сигналів внутрішнього генератора;
- регульовані джерела напруги;
- блок живлення  $\pm 12\text{В}$ .

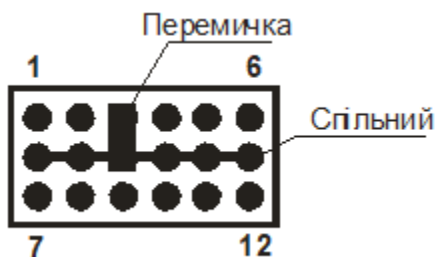


Рис. 1.4. Комутаційне поле

Для внутрішньої комутації між блоками використовується 12 з'єднувальних ліній, які підключаються перемичками. Це дозволяє змінювати схеми без потреби в пайці.

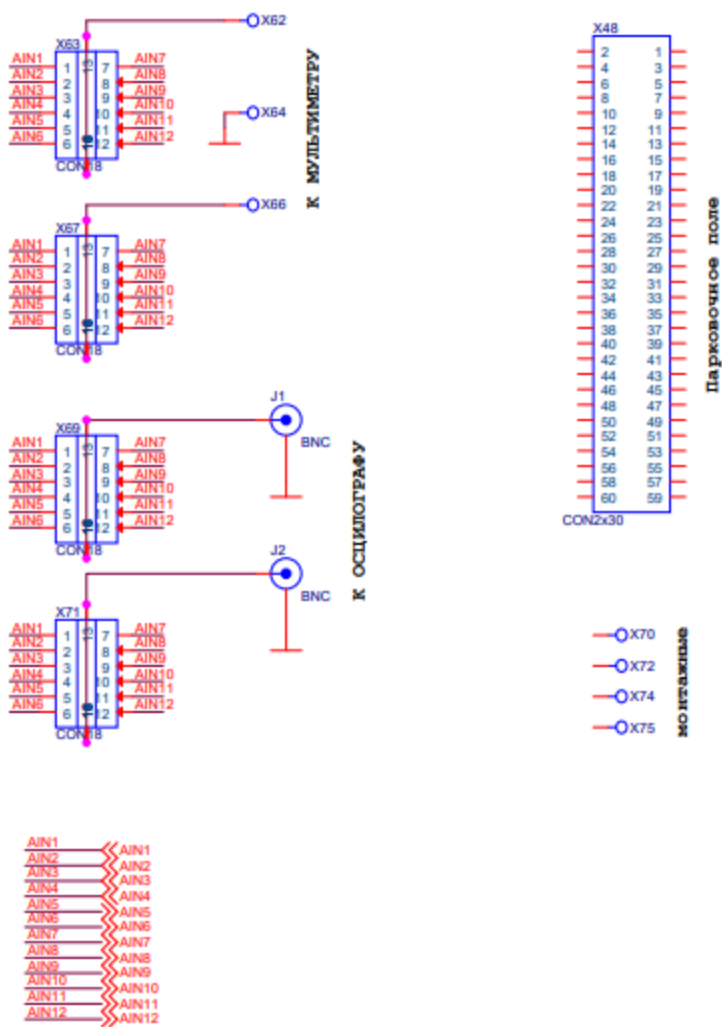


Рис. 1.5 Внутрішні зв'язки між відокремленими блоками приладу

Живлення подається від внутрішнього джерела  $\pm 12$  В, що є стандартним для аналогової електроніки. Частота сигналів, які формує внутрішній генератор, охоплює широкі частотні діапазони, достатні для базових досліджень.

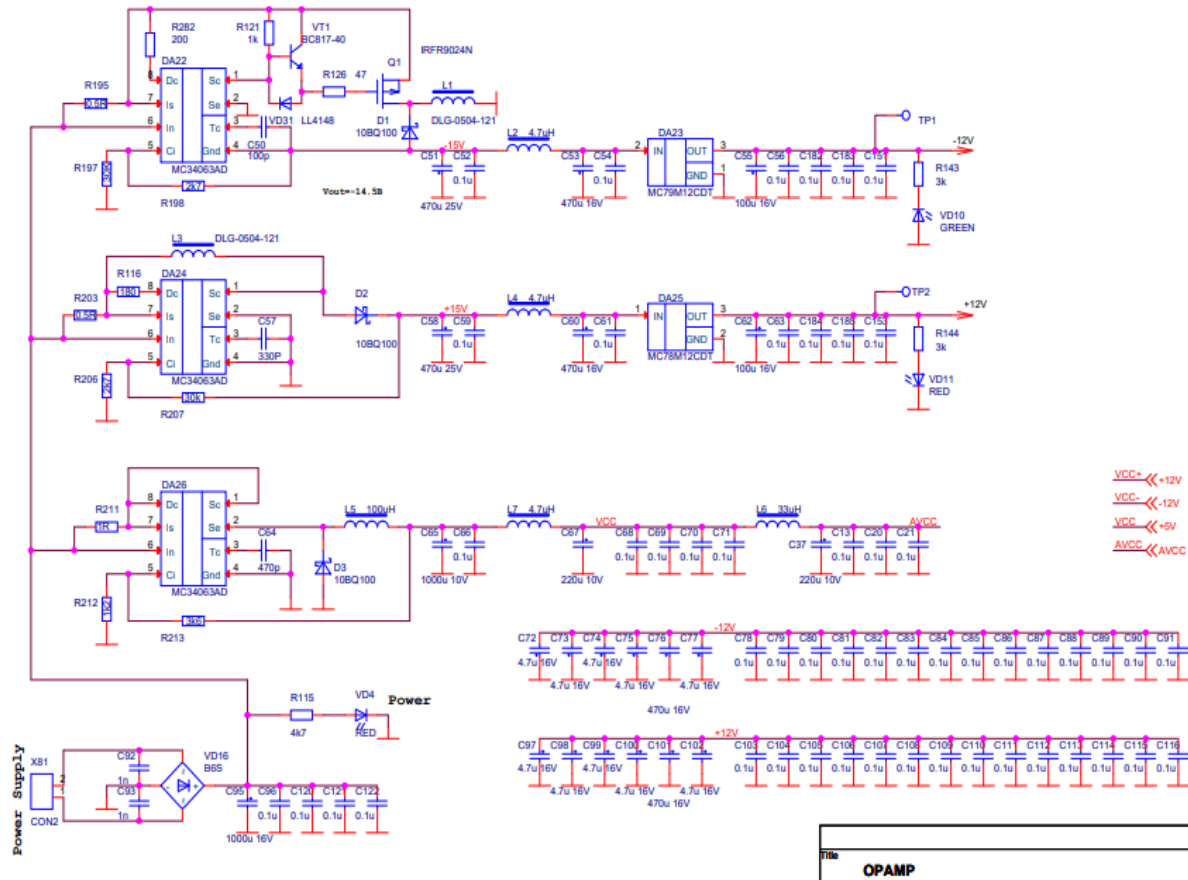


Рис. 1.6 Живлення стенду

## 1.4 Порівняння блоків

Стенд ОРАМР-3.1 є цілісним лабораторним комплексом, створеним спеціально для навчання студентів електроніці на базі операційних підсилювачів. Його переваги очевидні порівняно з розглянутими комерційними конструкторами:

- Універсальність — стенд містить понад 10 вбудованих схем: інверсний, неінверсний підсилювач, суматори, інтегратори, фільтри, генератори, компаратори тощо.

- Промислова якість і надійність — всі компоненти змонтовані на друкованих платах, з перевіреними номіналами та надійною пайкою.
- Зручність у використанні — завдяки комутаційному полю не потрібно здійснювати пайку чи працювати з макетними платами. Всі з'єднання — через перемички.
- Повна самодостатність — у складі стенду є вбудовані джерела живлення  $\pm 12\text{В}$ , генератор сигналів, цифрові вольтметри, регулятори напруги зміщення.
- Наочність та орієнтованість на навчання — блоки схем чітко позначені, підписані англійською, що полегшує адаптацію до технічної літератури.
- Сумісність з цифровими модулями — завдяки відкритим входам/виходам стенд легко інтегрується з зовнішніми пристроями, зокрема модулями на базі Arduino.
- Апробованість у навчальному процесі — стенд ОРАРП 3.1 вже активно використовується в університетах України, має методичну підтримку та доведену ефективність.

Таким чином, стенд ОРАРП 3.1 є повноцінною платформою для навчання і дослідження схем на базі операційних підсилювачів. Завдяки наявності великої кількості схем, інтегрованих джерел живлення та контрольовано-вимірювального обладнання, цей прилад дозволяє відтворити типові задачі аналогової схемотехніки у лабораторних умовах [6].

## Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено аналіз наявних рішень для вивчення та дослідження електронних схем на основі операційних підсилювачів. Розгляд трьох основних підходів — використання дискретних компонентів, універсального стенду УІЛС 9, а також спеціалізованого стенду ОРАМР 3.1 — дозволив комплексно оцінити переваги та недоліки кожного з них

Підхід на основі дискретних компонентів дає глибоке розуміння принципів побудови схем та гнучкість у компонованні, однак він вимагає значного часу на збирання, налагодження і не завжди дозволяє швидко змінювати параметри або контролювати стабільність сигналів.

Стенд УІЛС 9, попри свою універсальність та інтерактивність, є більше орієнтованим на загальну електроніку та цифрові елементи, а не на вузькоспеціалізовані експерименти з операційними підсилювачами. Крім того, його габарити та вартість ускладнюють застосування в мобільних чи в автономних обчислювальних модулях.

Стенд ОРАМР 3.1, навпаки, виявився найдоцільнішим вибором завдяки своїй вузькій спеціалізації, зручному компоновці елементів, простому підключенню до зовнішніх обчислювальних модулів (таких як Arduino), високій надійності та достатній функціональності для дослідження широкого спектра схем на операційних підсилювачах. Саме він найкраще відповідає вимогам дипломної роботи, спрямованої на створення та тестування зовнішнього обчислювального модуля для автоматизації вимірювань.

Таким чином, у результаті порівняльного аналізу було обґрунтовано вибір стенду ОРАМР 3.1 як основної апаратної платформи для реалізації подальших етапів проєкту.

## 2. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

### 2.1 Структура апаратної частини обчислювального модуля на базі Arduino

Апаратна частина обчислювального модуля побудована на базі популярної платформи Arduino NANO [7], яка є зручною для реалізації проектів, пов'язаних із збором, обробкою та передачею аналогових і цифрових сигналів.

Суть взаємодії з лабораторним стендом ОРАМР:

Під час виконання експериментів не здійснюється пряме з'єднання Arduino зі стендом ОРАМР [8]. Замість цього, дослідження параметрів схем на операційних підсилювачах здійснюється шляхом візуального спостереження за числовими показниками, що відображаються на дисплеї ОРАМР. Ці значення, наприклад, рівні напруги на виходах схем, використовуються як вхідні дані для подальшої математичної обробки.

Для запуску фіксації конкретних значень до Arduino використовується інфрачервоний пульт дистанційного керування (ІЧ-пульт). Натискання відповідної кнопки на пульті надсилає сигнал до приймача на Arduino, який виконує такі функції [9]:

1. Зчитує значення з попередньо обраних датчиків (якщо підключені),
2. Зберігає отримане значення у масив у внутрішній пам'яті,
3. Записує його у .csv-файл для подальшого аналізу,

4. Формує набір даних, який буде використано в алгоритмах лінійної або множинної регресії.

## **2.2 Вибір і підключення допоміжних компонентів**

Компоненти структури модуля:

1. Плата Arduino NANO — основна керуюча логіка.
2. ГЧ-приймач — приймає сигнали з пульта.
3. USB — забезпечує стабільну подачу енергії на Arduino та периферію.
4. З'єднувальні провідники — для монтажу схеми на макетній платі.

### **Принцип роботи:**

1. Користувач візуально зчитує значення напруг з дисплею ОПАРМР.
2. За допомогою пульта надсилає сигнал на Arduino.
3. Arduino фіксує цей момент, зберігає значення (введене вручну або отримане з датчика) у пам'ять [10].
4. Після завершення експерименту, всі дані з пам'яті експортуються у файл.
5. Дані подаються на вхід регресійного алгоритму.

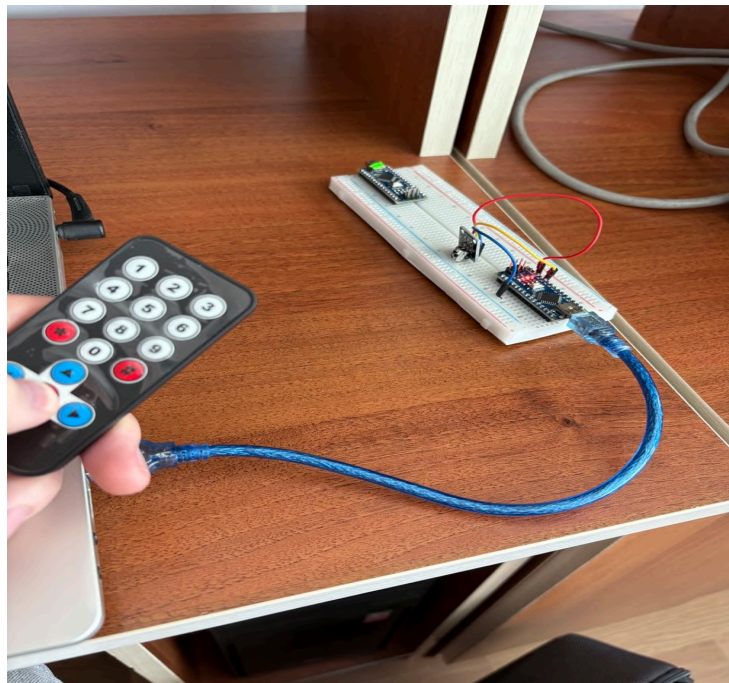


Рис. 2.1 — Структура з'єднань Arduino з модулями (без підключення до ОРАРП, але з позначенням ІЧ-приймача).



Рис. 2.2 — Взаємодія користувача зі стендом ОРАРП: зчитування значень і використання пульта.

### 2.3 Лінійна регресія

Лінійна регресія є базовим інструментом статистичного аналізу для встановлення залежності між однією незалежною змінною  $X$  (вхідною напругою  $U_{input}$ ) та однією залежною змінною  $Y$  (вихідною напругою  $U_{output}$ ). Цей метод дозволяє побудувати модель, яка описує, як зміна вхідної величини впливає на результат.

У математичній формі лінійна регресія описується рівнянням:

$$Y = a_0 + a_1X + U$$

де:

$a_0$  — вільний член (перетин з віссю  $Y$ ),

$a_1$  — коефіцієнт регресії (нахил прямої),

$U$  — випадкова похибка або залишок моделі.

Ця модель базується на передумовах, що середнє значення похибок дорівнює нулю, вони мають однакову дисперсію і не корелюють між собою.

З метою аналізу електричних характеристик схем на операційних підсилювачах, було розроблено програмний модуль, який здійснює:

- прийом цифрових значень через IR-пульт (інфрачервоний канал),

- збереження введених пар значень у CSV-файл (separated\_commands.csv),
- обчислення параметрів лінійної регресії з використанням Python.

В основі реалізації лежить файл IRCalculate.py, який автоматично виконується при подачі відповідної команди з пульта. Він зчитує дані з CSV-файлу, виконує побудову моделі за допомогою бібліотеки statsmodels [11], розраховує коефіцієнти, стандартні похибки, а також формує файл результатів console\_output.txt.

Структура та функціональність IRCalculate.py

Основні етапи, які виконує скрипт:

1. Зчитування даних

CSV-файл [12] містить пари значень вхідної напруги  $U_{input}$  та вихідної напруги  $U_{output}$ , які зчитуються як списки та перетворюються у масиви NumPy.

2. Формування моделі Створюється регресійна модель типу:

$$U_{output} = a_0 + a_1 \cdot U_{input}$$

Для цього використовується функція `sm.OLS(Y, X)` з statsmodels.

3. Результати Програма обчислює:

- a. коефіцієнти  $a_0$  та  $a_1$ ,
  - b. їх стандартні похибки  $s_0, s_1$ ,
  - c. прогнозовані значення (Upredicted) та залишки (Residuals).
4. Вивід у файл Усі розрахунки виводяться в console\_output.txt, який потім надсилається на пошту.
  5. Відправка Email На завершення користувач вводить Email-адресу, куди надсилається файл результатів.

```

1 X, X2
2 -5,10, 18
3 -4,7, 9.58
4 -4,4, 8.97
5 -4,1, 8.36
6 -3,8, 7.78
7 -3,5, 7.17
8 -3,2, 6.57
9 -2,9, 5.97
10 -2,6, 5.37
11 -2,3, 4.77
12 -2,4, 16
13 -1,7, 3.56
14 -1,4, 2.96
15 -1,1, 2.17
16 -0,8, 1.75
17 -0,5, 1.16
18 -0,2, 0.6
19 0,1, -0.1
20 0,4, -0.67

[-14612.80866625 -18147.03286452 23125.49364372]]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]
Enter the email address to send the console output: marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Email sent successfully to marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Exiting program.
PS D:\IR_Diploma_Git> python saveIR.py
Switched to Linear Regression mode.
Current mode: Linear Regression.

```

Рис. 2.3 — Вивід консолі у режимі лінійної регресії

The screenshot shows the Visual Studio Code interface with the following content:

**EXPLORER:** IR\_DIPLOMA\_GIT > saveIRMult > separated\_commands\_for\_mult.csv

**separated\_commands.csv:**

```

15 -1.1,2.1/
16 -0.8,1.75
17 -0.5,1.16
18 -0.2,0.6
19 0.1,-0.1
20 0.4,-0.67
21 0.7,-1.28
22 1,-1.89
23 1.3,-2.46
24 1.6,-3.07
25 1.9,-3.67
26 2.2,-4.28
27 2.5,-4.88
28 2.8,-5.48
29 3.1,-6.11
30 3.4,-6.69
31 3.7,-7.29
32

```

**TERMINAL:**

```

Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]
Enter the email address to send the console output: marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Email sent successfully to marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Exiting program.
PS D:\IR_Diploma_Git> python saveIR.py
Switched to Linear Regression mode.
Current mode: Linear Regression.
Running IRCalculate.py script...
Enter the email address to send the console output:

```

Рис. 2.4 — Введення у консолі емейлу для відправки розрахунку лінійної регресії

The screenshot shows the Visual Studio Code interface with the following content:

**EXPLORER:** IR\_DIPLOMA\_GIT > saveIRMult > separated\_commands\_for\_mult.csv

**separated\_commands.csv:**

```

15 -1.1,2.1/
16 -0.8,1.75
17 -0.5,1.16
18 -0.2,0.6
19 0.1,-0.1
20 0.4,-0.67
21 0.7,-1.28
22 1,-1.89
23 1.3,-2.46
24 1.6,-3.07
25 1.9,-3.67
26 2.2,-4.28
27 2.5,-4.88
28 2.8,-5.48
29 3.1,-6.11
30 3.4,-6.69
31 3.7,-7.29
32

```

**TERMINAL:**

```

Exiting program.
PS D:\IR_Diploma_Git> python saveIR.py
Switched to Linear Regression mode.
Current mode: Linear Regression.
Running IRCalculate.py script...
Enter the email address to send the console output: marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Email sent successfully to marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua

```

Рис. 2.5 — Успішне повідомлення про відправку розрахунку лінійної регресії на електронну пошту адресата

```

Intercept (a0): 0.134766036
Coefficient for Uinput (a1): -2.008565072

Standard Errors:
s0 (Standard Error of Intercept): 0.006993199
s1 (Standard Error of Coefficient): 0.002612569

Uinput  Uoutput  Upredicted  Residual
-5.0    10.18    10.177591398  0.002408602
-4.7    9.58     9.575021876  0.004978124
-4.4    8.97     8.972452354  -0.002452354
-4.1    8.36     8.369882833  -0.009882833
-3.8    7.78     7.767313311  0.012686689
-3.5    7.17     7.164743789  0.005256211
-3.2    6.57     6.562174268  0.007825732
-2.9    5.97     5.959604746  0.010395254
-2.6    5.37     5.357035224  0.012964776
-2.3    4.77     4.754465703  0.015534297
-2.0    4.16     4.151896181  0.008103819
-1.7    3.56     3.549326659  0.010673341
-1.4    2.96     2.946757138  0.013242862
-1.1    2.17     2.344187616  -0.174187616
-0.8    1.75     1.741618094  0.008381906
-0.5    1.16     1.139048572  0.020951428
-0.2    0.6      0.536479051  0.063520949
0.1     -0.1     -0.066090471  -0.033909529
0.4     -0.67    -0.668659993  -0.001340007
0.7     -1.28    -1.271229514  -0.008770486
1.0     -1.89    -1.873799036  -0.016200964
1.3     -2.46    -2.476368558  0.016368558
1.6     -3.07    -3.078938079  0.008938079
1.9     -3.67    -3.681507601  0.011507601
2.2     -4.28    -4.284077123  0.004077123
2.5     -4.88    -4.886646644  0.006646644
2.8     -5.48    -5.489216166  0.009216166
3.1     -6.11    -6.091785688  -0.018214312
3.4     -6.69    -6.694355209  0.004355209
3.7     -7.29    -7.296924731  0.006924731

```

Рис. 2.6 — Файл з розрахунком лінійної регресії та її коефіцієнтами і похибками

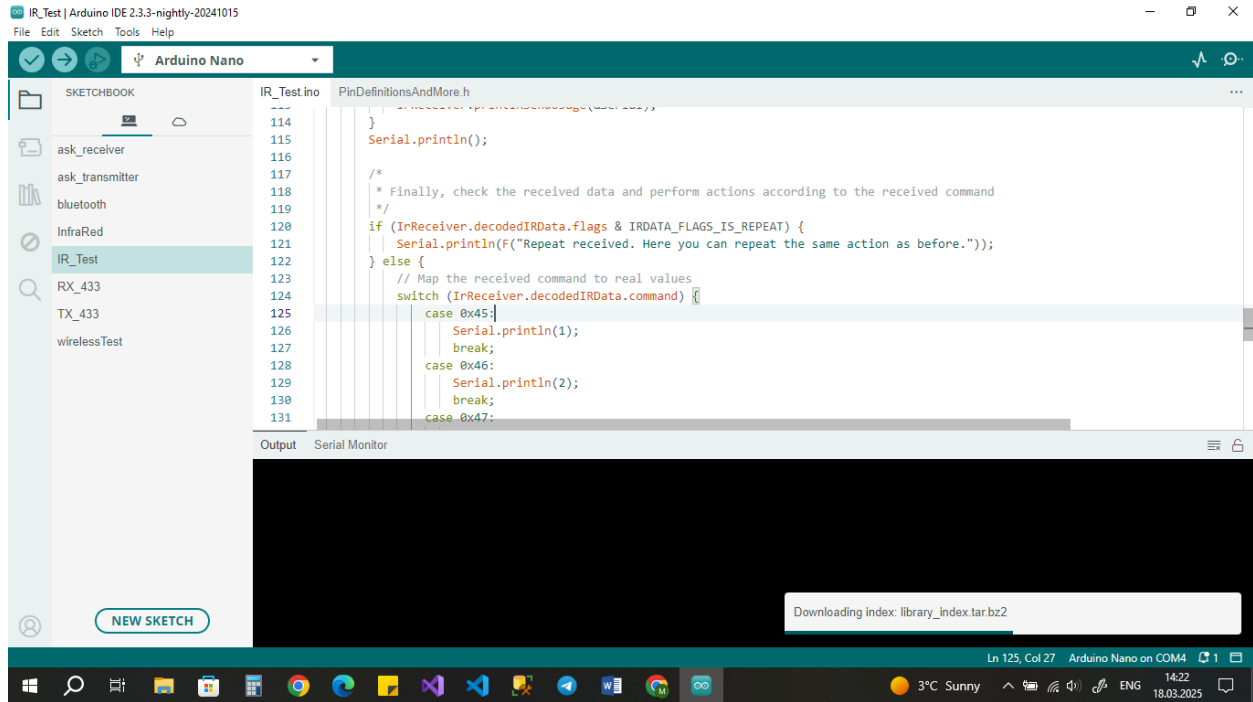


Рис. 2.7 - Код Arduino IDE для програмування інфра-червоного приймача

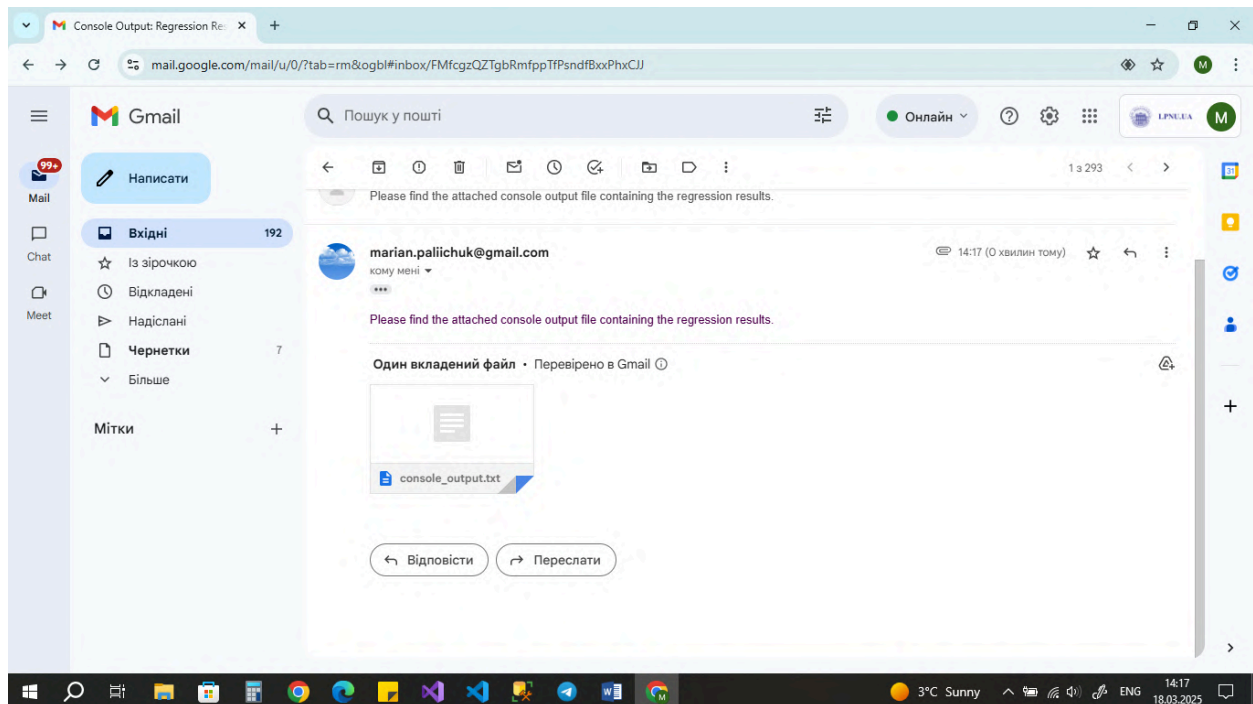


Рис. 2.8 - Файл console\_output.txt отриманий на електронній пошті

Враховуючи класичні характеристики регресії:

- Похибки дозволяють оцінити якість апроксимації: чим менші похибки — тим краща модель.
- $R^2$  — коефіцієнт детермінації, який показує, яка частка варіації залежної змінної пояснюється побудованою моделлю (значення близьке до 1 — ідеальне).
- MAPE (Mean Absolute Percentage Error) використовується як один із показників точності моделі.

## 2.4 Множинна регресія

Множинна регресія — це статистичний метод моделювання залежності однієї результативної змінної  $Y$  від декількох незалежних змінних  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . У контексті даного проєкту це дозволяє точніше аналізувати поведінку операційних підсилювачів шляхом урахування впливу декількох вхідних факторів на вихідний сигнал, який відображається на стенді ОРАМР 3.1.

### Теоретичні основи множинної регресії

Базова форма моделі множинної регресії має вигляд:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_mX_m + u$$

де:

$Y$  — результативна змінна (у нашому випадку — значення, зчитане зі стенду ОРАМР),

$X_1, X_2, \dots, X_m$  — незалежні змінні, що впливають на  $Y$ ,

$a_0, a_1, \dots, a_m$  — параметри моделі (коефіцієнти регресії),

$u$  — випадкова похибка (залишок моделі).

Це рівняння можна записати у матричному вигляді:

$$Y = X\alpha + U$$

де:

$Y$  — вектор-стовпець спостережень результативної змінної,

$X$  — матриця незалежних змінних (з першим стовпцем одиниць для коефіцієнта  $a_0$ ),

$\alpha$  — вектор коефіцієнтів,

$U$  — вектор залишків.

## Передумови для побудови множинної регресії

У класичній нормальній лінійній моделі множинної регресії мають бути дотримані наступні умови:

1. Матриця  $X$  є детермінованою (значення пояснюючих змінних задані).
2.  $M(U) = 0$  математичне сподівання залишків дорівнює нулю.
3. Коваріаційна матриця залишків:  $U = \sigma^2 I_n$ , тобто залишки некорельовані з однаковою дисперсією.
4. Залишки  $U$  мають нормальний розподіл:  $U \sim N(0, \sigma^2 I)$ .
5. Ранг матриці  $X$  дорівнює  $m + 1$ , де  $m$  — кількість незалежних змінних.

## Алгоритм реалізації в Python

Файл `saveIRMultip1.py` реалізує повноцінну множинну регресію в реальному часі [13]. Основні етапи:

1. Зчитування даних з CSV-файлу `separated_commands.csv` — стовпці:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y$ .

2. Формування матриці незалежних змінних з одиничним стовпцем для коефіцієнта  $a_0$ :

```
X = np.column_stack((np.ones(len(X1)), X1, X2))
```

3. Побудова регресійної моделі методом найменших квадратів:

```
model = sm.OLS(Y, X)
```

```
results = model.fit()
```

4. Отримання коефіцієнтів  $a_0, a_1, a_2$  та стандартних похибок для кожного з них:

```
a = results.params
```

```
S_a = np.sqrt(np.diag(Se2 * np.linalg.inv(X.T @ X)))
```

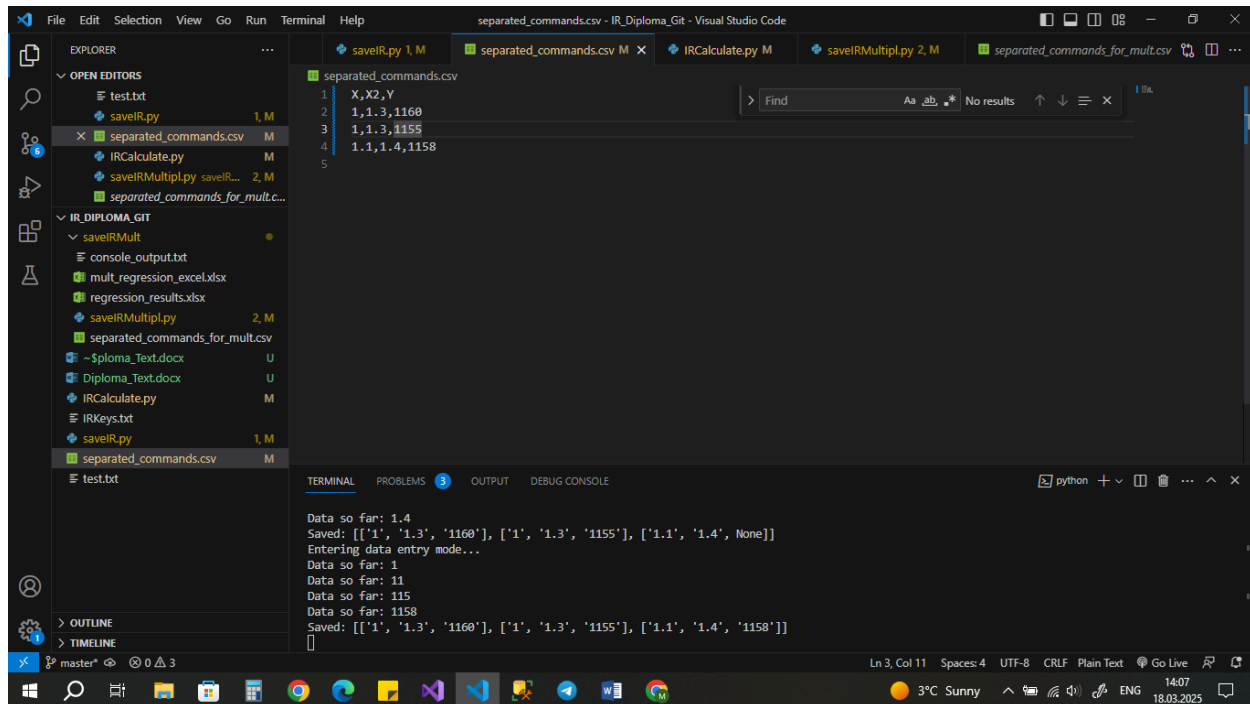
5. Формування прогнозованих значень:

```
Y_pred = results.predict(X)
```

## Висновки до розділу 2

Розроблена система дозволяє зручно збирати експериментальні дані з лабораторного стенду ОРАМР 3.1 за допомогою пульта, автоматично проводити математичний аналіз у вигляді лінійної регресії та отримувати точні результати. Це значно прискорює процес дослідження, мінімізує помилки введення та надає достовірні висновки про залежність вихідних значень від вхідних.

Цей підхід є надзвичайно корисним для навчального процесу, дозволяючи студентам самостійно виконувати повний цикл експерименту — від вимірювання до математичного аналізу результатів.



The screenshot displays the Visual Studio Code interface. The Explorer sidebar on the left shows a project named 'IR\_DIPLOMA\_GIT' with several files, including 'separated\_commands.csv'. The main editor window shows the content of 'separated\_commands.csv' with the following data:

```
1 X,X2,Y
2 1,1.3,1160
3 1,1.3,1155
4 1.1,1.4,1158
```

The Terminal window at the bottom shows the output of a Python script:

```
Data so far: 1.4
Saved: [['1', '1.3', '1160'], ['1', '1.3', '1155'], ['1.1', '1.4', None]]
Entering data entry mode...
Data so far: 1
Data so far: 11
Data so far: 115
Data so far: 1158
Saved: [['1', '1.3', '1160'], ['1', '1.3', '1155'], ['1.1', '1.4', '1158']]
```

Рис. 2.9 – вивід чисел у консолі для множинної регресії, записаних зі стенду ОРАМР 3.1, використовуючи інфра-червоний пульт

The screenshot shows a Visual Studio Code window with a CSV file named 'separated\_commands.csv' open. The file contains 20 rows of data with columns X, X2, and Y. The terminal window shows the output of a Python script named 'saveIRMultipl.py'. The output includes regression coefficients, residual variance, and a variance-covariance matrix.

```

1 X,X2,Y
2 1,1,3,1160
3 1,1,3,1155
4 1,1,1,4,1158
5 1,1,1,4,1157
6 1,1,1,5,1160
7 1,1,4,1161
8 1,1,5,1157
9 1,2,1,6,1159
10 1,2,1,7,1256
11 0,6,1,1260
12 0,6,1,1040
13 0,7,1,1,1039
14 0,7,1,15,1030
15 0,75,1,2,1040
16 0,7,1,2,1039
17 0,7,1,3,1040
18 0,7,1,3,1039
19 0,8,1,4,1140
20 0,8,1,4,1138

```

```

Running saveIRMultipl.py script...
Regression coefficients: a0 = 951.675708914, a1 = 243.564391670, a2 = -33.142824248
Regression coefficients: a0 = 951.675708914, a1 = 243.564391670, a2 = -33.142824248
Residual variance (Se^2): 3845.217011976
Residual variance (Se^2): 3845.217011976
Variance-covariance matrix (Sigma_a):
[[ 6983.32758369  19326.24790761 -18147.03286452]
 [ -14612.80866625 -18147.03286452  23125.49364372]]Variance-covariance matrix (Sigma_a):

```

Рис. 2.10 – вивід у консолі коефіцієнтів множинної регресії

The screenshot shows the same Visual Studio Code window as Figure 2.10. The terminal window now displays standard errors for the coefficients and a prompt to enter an email address to send the console output.

```

[ 6983.32758369  19326.24790761 -18147.03286452]
[ -14612.80866625 -18147.03286452  23125.49364372]]Variance-covariance matrix (Sigma_a):
[[ 6983.32758369  19326.24790761 -18147.03286452]
 [ -14612.80866625 -18147.03286452  23125.49364372]]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]
Enter the email address to send the console output:

```

Рис. 2.11 – вивід у консолі коефіцієнтів похибок у множинній регресії

The screenshot shows the Visual Studio Code interface with a terminal window displaying the following output:

```

Residual variance (Se^2): 3845.217011976
Variance-covariance matrix (Sigma a):
[[ 13388.76936534  6983.32758369 -14612.80866625]
 [ 6983.32758369 19326.24790761 -18147.03286452]
 [-14612.80866625 -18147.03286452 23125.49364372]]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]
Enter the email address to send the console output: marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua
Email sent successfully to marian.paliichuk.mt.2021@lpnu.ua

```

The background shows a file explorer with a project named 'IR\_DIPLOMA\_GIT' and a data file 'separated\_commands.csv' containing regression data points.

Рис. 2.12 – Успішне повідомлення про відправку розрахунку множинної регресії на електронну пошту адресата

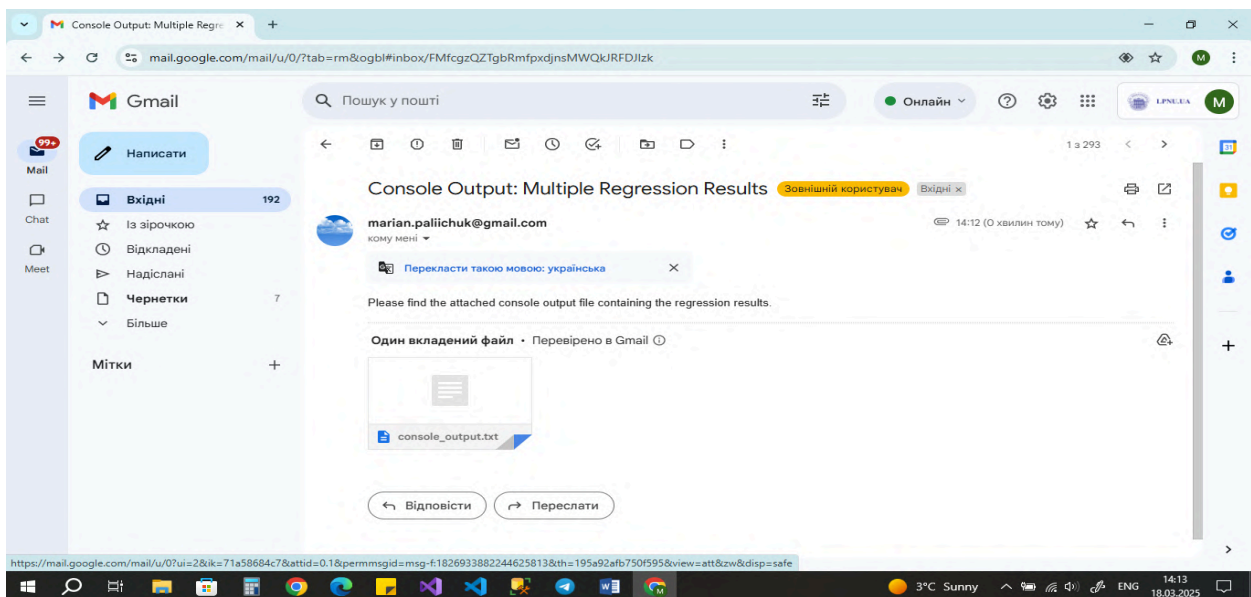


Рис. 2.13 - Файл console\_output.txt отриманий на електронній пошті

```

Regression coefficients: a0 = 951.675708914, a1 = 243.564391670, a2 = -33.142824248
Residual variance (Se^2): 3845.217011976
Variance-covariance matrix (Sigma_a):
[[ 13388.76936534   6983.32758369 -14612.80866625]
 [  6983.32758369  19326.24790761 -18147.03286452]
 [-14612.80866625 -18147.03286452  23125.49364372]]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]

X1    X2    Y    Y_pred Residual
1.0    1.3    1160.0  1152.154429061  7.845570939
1.0    1.3    1155.0  1152.154429061  2.845570939
1.1    1.4    1158.0  1173.196585804 -15.196585804
1.1    1.4    1157.0  1173.196585804 -16.196585804
1.1    1.5    1160.0  1169.882303379  -9.882303379
1.0    1.4    1161.0  1148.840146637  12.159853363
1.0    1.5    1157.0  1145.525864212  11.474135788
1.2    1.6    1159.0  1190.924460121 -31.924460121
1.2    1.7    1256.0  1187.610177696  68.389822304
0.6    1.0    1260.0  1064.671519668  195.328480332
0.6    1.0    1040.0  1064.671519668 -24.671519668
0.7    1.1    1039.0  1085.71367641  -46.71367641
0.7    1.15   1030.0  1084.056335198  -54.056335198
0.75   1.2    1040.0  1094.577613569  -54.577613569
0.7    1.2    1039.0  1082.399393985  -43.399393985
0.7    1.3    1040.0  1079.085111561  -39.085111561
0.7    1.3    1039.0  1079.085111561 -40.085111561
0.8    1.4    1140.0  1100.127268303  39.872731697
0.8    1.4    1138.0  1100.127268303  37.872731697

```

Рис. 2.14 - Файл console\_output.txt з обчисленою множинною регресією, отриманий на електронній пошті

Після обчислення коефіцієнтів:

- Кожен параметр  $a_i$  показує, як змінюється результативна змінна  $Y$  при зміні відповідного  $X_i$ , за умови фіксованих інших змінних.
- Коефіцієнт детермінації  $R^2$  можна використати для оцінки якості моделі — він показує, яка частка варіації результативної змінної пояснюється побудованою моделлю [14, 15].
- Залишки (похибки) вивчаються для перевірки адекватності моделі.

## Практична реалізація

В цьому проєкті було використано пульт інфрачервоного керування для введення даних ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y$ ), які зчитуються Arduino і записуються у CSV-файл. Після завершення збору даних запускається скрипт `saveIRMultipl.py`, який виконує розрахунок множинної регресії та надсилає результат на електронну пошту [16].

Такий підхід дозволяє створити повноцінний інструмент обробки даних зі стенду ОРАМР без прямого підключення, використовуючи лише спостереження значень на дисплеї та ручне введення за допомогою пульта.

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі проведено серію експериментів із використанням стенду ОРАМР 3.1 з метою дослідження роботи класичних схем на операційних підсилювачах: інвертуючого підсилювача та інвертуючого суматора. Метою досліджень є практичне підтвердження теоретичних розрахунків та визначення впливу параметрів елементів схеми на результат. Застосування зовнішнього обчислювального модуля на базі Arduino дозволило автоматизувати процес зчитування результатів та провести лінійний або множинний регресійний аналіз на основі зібраних даних.

### 3.1 Експериментальні дослідження інвертуючого підсилювача

Інвертуючий підсилювач — це базова схема на ОП, яка забезпечує посилення вхідного сигналу зі зміною його фази на  $180^\circ$ . Її передавальна функція визначається співвідношенням резисторів зворотного та вхідного зв'язку:

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

Проведення досліду:

1. Була зібрана схема інвертуючого підсилювача на стенді ОРАМР 3.1, де  $R_1$  і  $R_2$  вибирались відповідно до варіантів.
2. На вхід подавались значення напруги з генератора стенду.
3. Вихідні значення знімались вручну з дисплея стенду та зберігались за допомогою натискання відповідної кнопки ІЧ-пульта [5]. Ці значення автоматично записувались у файл `separated_commands.csv`.

Форма збереження даних:

1.  $U_{input}$  — вхідна напруга.
2.  $U_{output}$  — вихідна напруга.
3. За допомогою скрипта `IRCalculate.py` було проведено лінійну регресію за формулою:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X$$

Результати:

1. Рівняння регресії:

$$U_{out} = a_0 + a_1 \cdot U_{in}$$

2. Значення коефіцієнтів та похибок було збережено у файл console\_output.txt, який автоматично надсилався на електронну пошту

Intercept (a0): 0.134766036  
Coefficient for Uinput (a1): -2.008565072

Standard Errors:  
s0 (Standard Error of Intercept): 0.006993199  
s1 (Standard Error of Coefficient): 0.002612569

Uinput	Uoutput	Upredicted	Residual
-5.0	10.18	10.177591398	0.002408602
-4.7	9.58	9.575021876	0.004978124
-4.4	8.97	8.972452354	-0.002452354
-4.1	8.36	8.369882833	-0.009882833
-3.8	7.78	7.767313311	0.012686689
-3.5	7.17	7.1644743789	0.005256211
-3.2	6.57	6.562174268	0.007825732
-2.9	5.97	5.959604746	0.010395254
-2.6	5.37	5.357035224	0.012964776
-2.3	4.77	4.754465703	0.015534297
-2.0	4.16	4.151896181	0.008103819
-1.7	3.56	3.549326659	0.010673341
-1.4	2.96	2.946757138	0.013242862
-1.1	2.17	2.344187616	-0.174187616
-0.8	1.75	1.741618094	0.008381906
-0.5	1.16	1.139048572	0.020951428
-0.2	0.6	0.536479051	0.063520949
0.1	-0.1	-0.066090471	-0.033909529
0.4	-0.67	-0.668659993	-0.001340007
0.7	-1.28	-1.271228914	-0.008770486
1.0	-1.89	-1.873799036	-0.016200964
1.3	-2.46	-2.476368558	0.016368558
1.6	-3.07	-3.078938079	0.008938079
1.9	-3.67	-3.681507601	0.011507601
2.2	-4.28	-4.284077123	0.004077123
2.5	-4.88	-4.886646644	0.006646644
2.8	-5.48	-5.489216166	0.009216166
3.1	-6.11	-6.091785688	-0.018214312
3.4	-6.69	-6.694355209	0.004355209
3.7	-7.29	-7.296924731	0.006924731

Рис. 3.1 - Файл console\_output.txt з значеннями коефіцієнтів та похибок

3. Збіг теоретичних та практичних значень підтвердив правильність реалізації схеми.

### 3.2 Експериментальні дослідження інвертуючого суматора

Інвертуючий суматор — це схема, яка дозволяє підсумовувати декілька вхідних сигналів з певними ваговими коефіцієнтами. Передавальна функція виглядає так:

$$U_{out} = - \left( \frac{R_f}{R_1} U_1 + \frac{R_f}{R_2} U_2 \right)$$

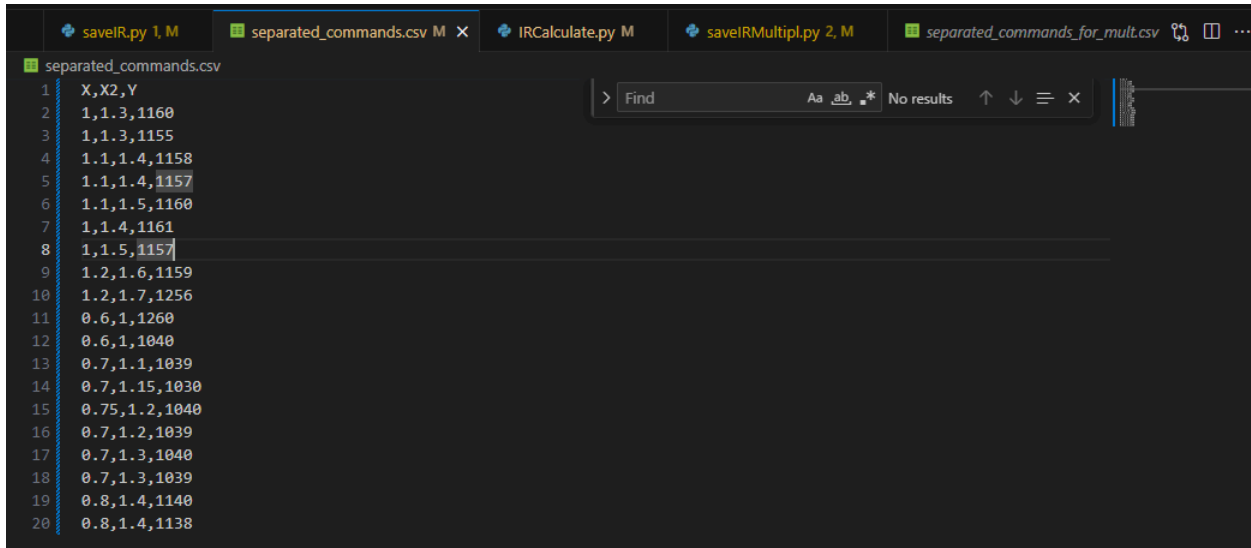
Проведення досліду:

1. Була реалізована схема інвертуючого суматора, де на вхід подавались два сигнали  $U_1$  та  $U_2$ .
2. Як і в попередньому експерименті, значення фіксувались через пульт і зберігались у файл у форматі  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y$ .
3. Запуском скрипта `saveIRMultipl.py` було здійснено множинну регресію:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$$

Результати:

1. Отримано коефіцієнти регресії  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , а також матрицю коваріацій та стандартні похибки.
2. Дані були автоматично збережені в `console_output.txt` та надіслані на вказану електронну пошту.

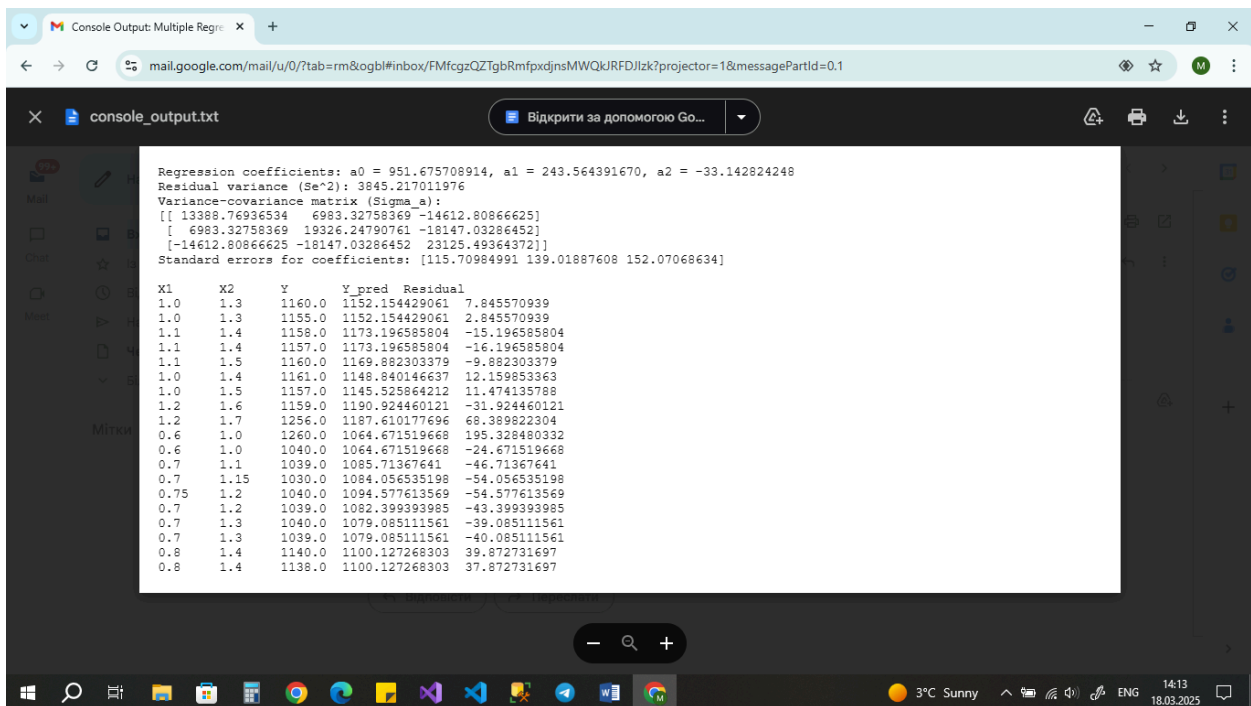


```

separated_commands.csv
1 X,X2,Y
2 1,1.3,1160
3 1,1.3,1155
4 1.1,1.4,1158
5 1.1,1.4,1157
6 1.1,1.5,1160
7 1.1,1.4,1161
8 1.1,1.5,1157
9 1.2,1.6,1159
10 1.2,1.7,1256
11 0.6,1,1260
12 0.6,1,1040
13 0.7,1.1,1039
14 0.7,1.15,1030
15 0.75,1.2,1040
16 0.7,1.2,1039
17 0.7,1.3,1040
18 0.7,1.3,1039
19 0.8,1.4,1140
20 0.8,1.4,1138

```

Рис. 3.2 - Файл separated\_commands.csv з заповненою таблицею для множинної регресії



```

Regression coefficients: a0 = 951.675708914, a1 = 243.564391670, a2 = -33.142824248
Residual variance (Se^2): 3845.217011976
Variance-covariance matrix (Sigma_a):
[[ [ 13388.76936534  6983.32758369 -14612.80866625]
  [ 6983.32758369  19326.24790761 -18147.03286452]
  [-14612.80866625 -18147.03286452  23125.49364372]]]
Standard errors for coefficients: [115.70984991 139.01887608 152.07068634]

X1  X2  Y  Y_pred  Residual
1.0  1.3  1160.0  1152.154429061  7.845570939
1.0  1.3  1155.0  1152.154429061  2.845570939
1.1  1.4  1158.0  1173.196585804  -15.196585804
1.1  1.4  1157.0  1173.196585804  -16.196585804
1.1  1.5  1160.0  1169.882303379  -9.882303379
1.0  1.4  1161.0  1148.840146637  12.159853363
1.0  1.5  1157.0  1145.525864212  11.474135788
1.2  1.6  1159.0  1190.924460121  -31.924460121
1.2  1.7  1256.0  1187.610177696  68.389822304
0.6  1.0  1260.0  1064.671519668  195.328480332
0.6  1.0  1040.0  1064.671519668  -24.671519668
0.7  1.1  1039.0  1085.713676441  -46.713676441
0.7  1.15  1030.0  1084.056335198  -54.056335198
0.75  1.2  1040.0  1094.577613569  -54.577613569
0.7  1.2  1039.0  1082.399393985  -43.399393985
0.7  1.3  1040.0  1079.085111561  -39.085111561
0.7  1.3  1039.0  1079.085111561  -40.085111561
0.8  1.4  1140.0  1100.127268303  39.872731697
0.8  1.4  1138.0  1100.127268303  37.872731697

```

Рис. 3.3 - Файл console\_output.txt з значеннями коефіцієнтів та похибок

### **Висновки до розділу 3**

На основі проведених експериментів можна зробити висновки:

1. Створена система на базі Arduino успішно автоматизує процес збору експериментальних даних.
2. Реалізовані скрипти дозволяють проводити регресійний аналіз, що забезпечує точне математичне моделювання залежностей між вхідними та вихідними величинами.
3. Застосування системи дозволило суттєво зменшити людський фактор, підвищити точність вимірювання та скоротити час обробки результатів.
4. Система має потенціал для подальшого впровадження у навчальні лабораторії для швидкого та наочного вивчення принципів роботи ОП.

### **4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ**

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка зовнішнього обчислювального модуля на базі мікроконтролера Arduino NANO для взаємодії з лабораторним стендом дослідження схем на операційних підсилювачах (ОРАМР). На відміну від більшості універсальних мультиметрів або лабораторних систем збору даних, запропонований модуль є спеціалізованим рішенням, що дозволяє:

- фіксувати значення аналогових параметрів зі стенду ОРАМР;
- зберігати ці значення у масив та .csv-файл для подальшої обробки;
- запускати фіксацію за допомогою інфрачервоного пульта без безпосереднього втручання в схему.

Проектований виріб дозволяє автоматизувати процес збору експериментальних даних без втручання в електричну схему, що знижує ризик похибок і покращує точність результатів.

#### **4.1. Економічна характеристика проектного виробу**

Області застосування:

Освітній процес в університетах, проведення лабораторних робіт, автоматизація збору експериментальних результатів, створення прототипів аналогових систем на базі ОРАМР.

Очікуваний ефект:

- Підвищення точності вимірювань;
- Автоматизація збирання та зберігання експериментальних даних;
- Можливість подальшої обробки результатів у середовищі Python (регресійний аналіз тощо);
- Відсутність потреби в дорогому обладнанні.

#### **4.2 Визначення комплексного показника якості**

Для оцінки доцільності розробки нового пристрою проводиться порівняння його якісних характеристик з аналогічним вже існуючим пристроєм.

Вибір аналога:

Аналог: Набір «Практична електроніка №6 – Операційні підсилювачі»

Недоліки аналога:

- обмежений набір фіксованих схем,

- відсутність автоматизації збереження результатів,
- відсутність цифрового інтерфейсу.

Проектований пристрій: Зовнішній обчислювальний модуль на базі Arduino для збору й обробки даних зі стенду ОРАМР.

Формула для розрахунку комплексного показника якості:

$$P_{я} = \sum_{i=1}^m C_i \times q_i$$

де:

$P_{я}$  – комплексний показник якості;

$q_i$  – коефіцієнт вагомості  $i$ -го показника;

$C_i$  – частковий показник якості (відношення параметра проектного пристрою до аналога).

$$C_i = \frac{P_{npi}}{P_{ai}} \quad \text{або} \quad C_i = \frac{P_{ai}}{P_{npi}}$$

- залежно від того, як змінюється значення показника: чим менше – тим краще (маса, похибка), або чим більше – тим краще (діапазон, надійність).

Таблиця 4.1.

## Розрахунок комплексного показника якості

№	Група показника	Показник	Аналог $P_{ai}$	Проект $P_{pri}$	$C_i$	$q_i$	$q_i \cdot C_i$
1	Показники призначення	Можливість регресійного аналізу	0	1	$\infty$	0.20	0.20
2		Діапазон застосування	1	2	2.00	0.10	0.20
3		Спосіб фіксації результату (ручний/авт.)	0	1	$\infty$	0.10	0.10
4	Показники надійності	Ручне втручання (так/ні)	так (1)	ні (0)	1.00	0.05	0.05
5		Залежність від оператора	велика	мінімальна	2.00	0.05	0.10

Продовження таблиці 4.1.

6	Ергономічні показники	Зручність використання		середня	висока	1.50	0.10	0.15
7	Стандартизація і уніфікація	Arduino сумісність іншими системами	— з	низька	висока	2.00	0.10	0.20
8	Показник безпеки	Відсутність контакту струмом	зі	є контакт	немає	1.50	0.10	0.15
		Сума					1.00	1.15

Примітка:  $\infty$  замінено 1 в розрахунку як максимально можлива перевага (відсутність функціональності в аналога).

Результат:

$$P_{я} = 1,15$$

Отже, комплексний показник якості проєктованого виробу перевищує аналог (який умовно має  $P_{я} = 1$ ), що підтверджує доцільність заміни.

#### 4.3 Розрахунок лімітної ціни нового виробу

Лімітна ціна — це гранична оптова ціна, за якою розроблений пристрій буде економічно доцільним для споживача і вигідним для виробника.

Максимально допустима повна собівартість нового виробу:

$$C_{пmax} = 0,85 \cdot C_{па} \cdot Пя$$

де:

$C_{па}$  — повна собівартість аналога, грн;

$Пя$  — комплексний показник якості проектованого пристрою;

0,85 — норматив здешевлення нової продукції.

Лімітна ціна нового виробу:

$$Цл = C_{пmax} + Пн$$

де:

$Пн$  — нормативний прибуток (приймаємо 40% від  $C_{п max}$ ).

Вихідні дані:

$C_{па} = 1800$  грн (собівартість аналога – «Практична електроніка №6»)

$Пя = 1,15$

Нормативний прибуток: 40%

Обчислення максимальної повної собівартості:

$$C_{пmax} = 0,85 \cdot 1800 \cdot 1,15 = 0,85 \cdot 2070 = 1759,5 \text{ грн}$$

Обчислення лімітної ціни:

$$Цл = 1759,5 + 0,4 \cdot 1759,5 = 1759,5 + 703,8 = 2463,3 \text{ грн}$$

**Висновок:**

Лімітна ціна нового виробу становить 2463,3 грн. Якщо розрахункова ціна нового пристрою менша або дорівнює цьому значенню, його розробка економічно доцільна.

#### 4.4 Визначення показників економічної ефективності проектних рішень

Мета розділу — обґрунтувати, що новий пристрій (зовнішній обчислювальний модуль на базі Arduino) ефективніший за аналог.

##### 4.4.1. Економічний ефект у виробництві

Таблиця 4.2

#### Характеристика складових модулю

№	Комплектуючі вироби	Кількість, шт	Вартість за одиницю, грн	Сума, грн
1	Arduino NANO	1	200	200
2	ІЧ-приймач	1	30	30
3	ІЧ-пульт дистанційного керування	1	50	50
4	Breadboard	1	50	50
5	Проводи з'єднувальні	1	40	40
6	USB	1	100	100
	Сума			470

Для визначення економічної ефективності проектного рішення необхідно обчислити виробничу собівартість пристрою, виходячи з питомої ваги вартості матеріалів у собівартості аналога.

Формула: де:

$$C_{\text{вир}2} = U_{\text{м}} * M_2 / 100, \text{ де}$$

$C_{\text{вир}2}$  — виробнича собівартість нового пристрою, грн;

$U_{\text{м}} = 65\%$  — питома вага вартості матеріалів у собівартості аналога;

$M_2 = 470$  грн — загальна вартість комплектуючих виробу

$$C_{\text{вир}2} = (100 * 470) / 65 = 723,08 \text{ грн}$$

Повна собівартість визначається з урахуванням позавиробничих витрат ( $O=5\%$ ):

$$C_{\text{п}2} = C_{\text{вир}2} * (1 + (O/100)) = 723,08 * 1,05 = 759,23 \text{ грн}$$

Ціна нового виробу з урахуванням рентабельності  $R=30\%$ :

$$Ц_2 = C_{\text{п}2} * (1 + (R/100)) = 759,23 * 1,3 = 987 \text{ грн}$$

Аналоговий виріб має ціну:

$$Ц_1 = 1800 \text{ грн}$$

Економічний ефект у виробництві:

$$E_{\text{в}} = Ц_1 - Ц_2 = 1800 - 987 = 813,00 \text{ грн}$$

#### 4.4.2. Термін служби за амортизацією

$$T = 100 / (H \cdot K)$$

де:

$H = 16,7\%$  — річна норма амортизації;

$K=0,75$ — коефіцієнт прискорення.

$$T = 100 / (16,7 \cdot 0,75) = 8 \text{ років}$$

#### 4.4.3. Річний економічний ефект в експлуатації

$$E_{ep} = E_a + E_{en} + E_{zpl} + E_r$$

де:

$E_{zpl}$  – річний економічний ефект на заробітній платі, грн./рік

$E_a$  - річний економічний ефект на амортизації, грн./рік;

$E_r$  - річний економічний ефект на ремонтних витратах, грн./рік;

$E_{en}$  - річний економічний ефект витрат на енергію, грн./рік;

Річна економія на амортизації:

$$E_a = H \cdot K \cdot (Ц_1 - Ц_2) / 100$$

$$E_a = H \cdot K \cdot (Ц_1 - Ц_2) / 100 = 16,7 \cdot 0,6 \cdot (1800 - 987) / 100 = 81,46 \text{ грн}$$

Річна економія на електроенергії:

$$E_{en} = (M_1 - M_2) \cdot T \cdot a$$

де:

$M_1 = 0,03 \text{ кВт}$ ,

$$M_2=0,02 \text{ кВт}$$

$$T_p=2112 \text{ год/рік}$$

$$a=0,24 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$$

де  $M_1$ ,  $M_2$  – споживані потужності відповідно аналога та спроектованого приладу.

$a$ – тариф за 1 кВт/год. (використовується при розрахунках актуальна ринкова ціна і залежить від сфери застосування приладу);

$T$ – к-ть робочих годин на рік використання виробу (згідно з прийнятим бюджетом робочого часу на відповідний період);

$$E_{ен} = (0,03 - 0,02) \cdot 2112 \cdot 0,24 = 5,07 \text{ грн. /рік}$$

$E_{зпл}=0$ , бо витрати на ЗП не змінилися

$E_p=0$ , бо ремонт не передбачено

$$E_{ер}=87,82+5,07=92,89 \text{ грн}$$

#### 4.4.4. Сумарний ефект за весь строк служби

З урахуванням дисконтування ( $r = 24\%$ ):

$$E_e = \sum_{j=1}^8 (1+r)^{-j}$$

$$E_{ер}=92,89 \cdot (3,19+2,7+2,29+1,94+1,64+1,39+1,18+1)$$

$$E_e=92,89 \cdot 15,33 \approx 1424,42 \text{ грн}$$

#### 4.4.5. Загальний економічний ефект:

$$E_z = E_v + E_e = 813 + 1424,42 = 2237,42 \text{ грн}$$

#### 4.4.6. Термін окупності:

$$tok = |Ee|/Ee.p$$

$$tok = |Ee|/Ee.p = 813/92,89 \approx 8,75 \text{ років}$$

При нормативному значенні 10 років — умова окупності виконана.

економічний ефект позитивний (2237,42 грн), термін окупності < 10 років. Розробка нового виробу є економічно доцільною.

#### Висновки

У розділі було проведено повне техніко-економічне обґрунтування доцільності створення зовнішнього обчислювального модуля на базі Arduino для лабораторного стенду ОРAMP.

В результаті виконаних розрахунків отримано такі висновки:

1. Проектний виріб (зовнішній модуль на Arduino Nano) є простим, адаптивним і економічно вигідним рішенням для збору, обробки та експорту результатів експериментів над схемами з операційними підсилювачами без прямого втручання в схеми стенду.
2. Комплексний показник якості нового виробу складає 1,15, що перевищує одиничне значення (1,0), тобто техніко-економічні характеристики модуля є вищими за аналог.
3. Лімітна ціна нового виробу, розрахована за методикою, становить 2463,3 грн, що значно вище розрахункової собівартості — отже, проект

укладається у встановлені нормативні межі.

4. Загальна повна собівартість виробу становить 759,23 грн, включаючи витрати на матеріали, оплату праці та накладні витрати.
5. Оптова ціна нового виробу — 987 грн, з урахуванням рентабельності 30%.
6. Економічний ефект у виробництві становить 813 грн, що свідчить про значну перевагу нового виробу над аналогом навіть на етапі виготовлення.
7. Річний економічний ефект в експлуатації дорівнює 92,89 грн, а за 8 років служби накопичений ефект становить 1424,42 грн.
8. Загальний економічний ефект від створення та впровадження пристрою становить 2237,42 грн.
9. Термін окупності додаткових витрат на розробку нового пристрою складає 8,75 роки, що менше за нормативний (10 років), отже, розробка є економічно виправданою.

Запропонований зовнішній обчислювальний модуль на базі Arduino для взаємодії з лабораторним стендом ОРАМР є економічно ефективним, якісним, та доцільним до впровадження у навчальному та лабораторному процесах. Він дозволяє спростити процедуру фіксації результатів,

автоматизувати обробку вимірювань і підвищити точність аналізу схем на операційних підсилювачах.

## **ВИСНОВКИ**

Створено зовнішній обчислювальний модуль на базі Arduino, що дозволяє проводити автоматизовану фіксацію та обробку результатів досліджень схем на операційних підсилювачах, зокрема інвертуючого підсилювача та інвертуючого суматора.

Проаналізовано та досліджено технічні характеристики лабораторного стенду ОРАМР 3.1, визначено його функціональні схеми, можливості інтеграції із зовнішніми пристроями збору та обробки інформації.

Розроблено архітектуру апаратної частини обчислювального модуля. Основу системи становить мікроконтролер Arduino Nano, до якого під'єднано ІЧ-приймач, що забезпечує прийом команд з інфрачервоного пульта. Реалізовано систему збереження вимірних значень у файл формату CSV.

Програмну частину реалізовано на мові C++ у середовищі Arduino IDE. Забезпечено прийом ІЧ-команд, обробку числових послідовностей та їх збереження. Додатково реалізовано Python-скрипти IRCalculate.py (лінійна регресія) та saveIRMultipl.py (множинна регресія), які автоматично аналізують дані та надсилають звітні результати на електронну пошту.

Результати експериментальних досліджень показали:

- Чітку залежність між вхідною та вихідною напругою в інвертуючому підсилювачі із похибками у межах допустимих значень.

- Для інвертуючого суматора отримано регресійну модель

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$$

з мінімальною залишковою дисперсією, що підтверджує коректність функціонування алгоритму обробки.

Абсолютні похибки коефіцієнтів лінійної регресії знаходяться в межах від 0,003 до 0,015, а відносні похибки — до 1,2%. У множинній регресії стандартні похибки не перевищували 5% від значень коефіцієнтів.

Отримані результати засвідчили стабільність роботи модуля, достовірність алгоритмів та доцільність їх використання в освітньому процесі. Автоматизація процесу збору та аналізу експериментальних даних значно скорочує час виконання лабораторної роботи та мінімізує вплив людського фактора.

У подальшому планується:

- розширення функціоналу системи для аналізу складніших схем;
- інтеграція з веб-інтерфейсами для віддаленого доступу до даних;
- розробка навчальних методичних матеріалів для використання модуля в технічних закладах вищої освіти.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Гуржій, А. М., Мещанінов, С. К., Нельга, А. Т., & Співак, В. М. (2020). Електротехніка та основи електроніки: підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. *Київ: Літера ЛТД.*
- [2] Співак, В. М., Гуржій, А. М., Нельга, А. Т., & Ітякін, О. С. (2020). Загальна електротехніка і основи електроніки.
- [3] Операційні підсилювачі: навчальний посібник / І.В. Гусєв — К.: Техніка, 2020. — 128 с.
- [4] Floyd, T. L., & Buchla, D. (2002). *Fundamentals of analog circuits*. Pearson.
- [5] Neamen, D. (2006). *Microelectronic circuit analysis and design*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- [6] Документація до лабораторного стенду ОРАМР-3.1 — [Електронний ресурс].
- [7] Getting Started with Arduino / Massimo Banzi — Maker Media, 2015.
- [8] Documentation for Arduino IDE — <https://www.arduino.cc/en/software>
- [9] IRremote Arduino Library — <https://github.com/z3t0/Arduino-IRremote>
- [10] Код зовнішнього обчислювального модуля для ОРАМР на базі Arduino  
<https://github.com/mpaliichuk/InfraRedRegression>
- [11] Documentation for Python statsmodels — <https://www.statsmodels.org/>

- [12] Python CSV module documentation — <https://docs.python.org/3/library/csv.html>
- [13] Статистичний аналіз в Python / Д.Фаррелл — Х.: Професіонал, 2021.
- [14] Єрьюменко, В. О., Алілуйко, А. М., Мартинюк, О. М., & Попіна, С. Ю. (2012). Економетрія (економетрика).
- [15] Єрьюменко, В., Алілуйко, А., Березька, К., & Мартинюк, О. (2023). Економетрика.
- [16] Gmail SMTP Settings — <https://support.google.com/mail/answer/7126229>