

**КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 620.179.16:681.5.017

**ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ RED PITAUA В ТЕХНОЛОГІЇ  
ПРОТОТИПУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ  
ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ***Левченко О. Е.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [levchenko.oleksandr@hotmail.com](mailto:levchenko.oleksandr@hotmail.com)*

*Автоматизований вихрострумний неруйнівний контроль відіграє важливу роль у системі контролю якості виробів з електропровідних матеріалів як на етапі виробництва, так і під час їх експлуатації. Поява нових сплавів, ускладнення геометрії виробів та умов контролю, підвищення вимог щодо достовірності та вірогідності результатів контролю стимулюють прискорення процесу створення нових засобів вихрострумного контролю. Технологія прототипування дає змогу вирішити це завдання. Метою статті є аналіз функціональних можливостей та технічних характеристик Red Pitaya для використання в технології прототипування засобів вихрострумного контролю, а також створення на її основі архітектури прототипу автоматизованої системи вихрострумного контролю.*

*Вибір платформи Red Pitaya як зручного інструменту для прототипування автоматизованих систем був зроблений завдяки її функціональності, надійності та доступності. В цілому, стаття висвітлює переваги та перспективи використання платформи Red Pitaya в прототипуванні автоматизованих систем вихрострумного неруйнівного контролю. Детально розглянуто аспекти апаратного забезпечення Red Pitaya та його можливості для розширення функціоналу, що дає змогу створювати високоефективні та гнучкі системи контролю. Розглянуто питання сумісності Red Pitaya з іншими пристроями та аксесуарами, що значно підвищують її універсальність та адаптивність до різних вимог та застосувань.*

*В статті наголошено на важливості використання в сукупності з Red Pitaya застосунку Jupyter Notebook як зручного інструменту для розроблення програмного забезпечення. Це сприяє полегшенню процесу створення та програмної реалізації складних алгоритмів опрацювання сигналів у системах вихрострумного контролю, забезпечує гнучкість у створенні нових програмних продуктів.*

*Сучасні тенденції та перспективи розвитку вихрострумного контролю, потреби ринку та можливість адаптації до різних сценаріїв застосування враховані в запропонованій архітектурі прототипу автоматизованої системи вихрострумного контролю.*

**Ключові слова:** *системи вихрострумного контролю; Red Pitaya; прототипування; проектування; автоматизація.*

**Вступ**

Прискорення темпів розвитку та обсягів виробництва, яке відбувається в період четвертої науково-технічної революції, вимагає постійного оновлення засобів вимірювання, контролю та діагностики, розширення їх номенклатури та функціональних можливостей. Це стосується також засобів неруйнівного контролю (НК), які є невід'ємною частиною сучасного високотехнологічного виробництва. Вимога щодо прискорення процесів розроблення та виготовлення нових засобів НК потребує застосування нових прогресивних технологій їх проектування. До таких технологій належить прототипування [1]. Ця технологія активно застосовується у таких сферах діяльності людини як

машинобудування, транспорт, дизайн, розроблення інтелектуальних продуктів тощо. Вона надає змогу на ранніх стадіях проектування перевірити придатність запропонованих концепцій, архітектурних і технологічних рішень, виявити недоліки, внести необхідні зміни у майбутній виріб, перевірити його функціональні можливості щоб якнайповніше задовольнити вимоги споживача.

Але технологія прототипування ще не набула належного поширення у галузі НК в цілому та у вихрострумному контролі (ВСК) зокрема. Це пов'язано з тим, що прототипування в цій галузі вимагає створення певних апаратно-програмних засобів, за допомогою яких можна було б апробувати різні режими контролю та алгоритми оброб-

лення сигналів, розв'язувати завдання відбору та відсіювання інформативних параметрів сигналів, ефективність різних перетворювачів в системі «об'єкт контролю – перетворювач», особливості реалізації процесу контролю в автоматичному режимі тощо.

Застарілі методи прототипування автоматизованих систем вихрострумowego контролю без застосування сучасних технологій не задовольняють рівню вимог, які постають перед науковцями та інженерами-дослідниками в сьогodнішньому інформаційному суспільстві. На сьогодні багато відомих комерційних фірм таких, як Olympus Corporation, Acuren Inspection Inc, Ashtead Technology, Eddyfi, Sonatest Ltd, LynX Inspection розробляють засоби НК, але застосовані в них алгоритми опрацювання сигналів є закритими, а самі сигнали перетворювачів недоступні для апробації інших алгоритмів. Швидке розроблення прототипу на основі використання певної сукупності вимірювальних інструментів та програмного забезпечення ускладнене багатьма факторами, зокрема, вузькою спеціалізацією інструментів та їх значною вартістю. Тому актуальною задачею НК є пришвидшення розроблення прототипу засобу НК й отримання інформативного сигналу від перетворювача для подальшого опрацювання.

Використання універсальних плат обробки експериментальних даних для реалізації технології прототипування значно скорочує час розроблення, виробництва та утворення прототипу апаратно-програмних засобів НК і надає змогу зменшити час, що витрачається на налаштування апаратної частини.

#### **Аналіз актуальних досліджень**

Задача автоматизації процесу вихрострумowego НК лишається актуальною і постійно притягують увагу фахівців НК, про що свідчить аналіз останніх публікацій з цієї тематики. Зокрема в роботі [2] описується застосування автоматизованої системи вихрострумowego контролю SD-PC-12 компанії “Techfour” для виявлення на поверхнях літальних апаратів дефектів таких, як тріщини, корозія та інші. Автори наводять приклади використання годографів в авіаційній промисловості та наголошують на важливості цієї технології для забезпечення безпеки польотів та підвищення якості виробництва літальних апаратів. Також відома робота [3], у якій розглянуто використання фігур Ліссажу з низькою роздільною здатністю. Для цього було використано алгоритми комп'ютерного зору, який здатен зчитувати та аналізувати зображення з вихрострумowych перетворювачів. Також автоматизовані системи зайняли важливе місце в залізничному транспорті. Відомі системи неруйнівного контролю забезпечують виявлення дефектів осей для колії під час їх виробництва [4]. В роботах [5, 6] розглядаються автоматизовані системи вихрострумowego контролю,

які здійснюють виявлення дефектів у рейках залізничного транспорту під час виробництва та експлуатації.

Сучасні можливості інформаційно-вимірювальних технологій, засобів електроніки та обчислювальної техніки створюють передумови для створення нових засобів вихрострумowego НК на основі технології прототипування, які дадуть змогу виконувати дослідження нових методів опрацювання вимірювальної інформації.

Апаратна платформа для прототипування автоматизованих систем вихрострумowego НК має задовольняти наступним вимогам:

- Прототип системи повинен забезпечити високу точність і надійність виявлення дефектів, таких як тріщини, корозія та інші пошкодження поверхні матеріалів. Прототип повинен мати можливість адаптації до різних матеріалів та геометрії об'єктів контролю.
- Інтерфейс користувача має бути зручним й інтуїтивно зрозумілим, надавати можливість проводити контроль, оперативно переналаштовувати параметри контролю, а також переглядати й аналізувати результати.
- Прототип системи має враховувати обмеження на розмір апаратури, швидкість оброблення даних, енергоспоживання та відповідати стандартам безпеки. Прототип повинен бути сумісним із різними датчиками, вимірювальними пристроями та платформами.
- Прототип має бути сумісним з існуючими системами виробництва та контролю якості, що дозволить швидко інтегрувати його в робочий процес без значних змін в інфраструктурі.
- Прототип системи повинен мати високу швидкість роботи та забезпечувати мінімальні затримки між виявленням дефекту та його відображенням на інтерфейсі користувача. Автоматизація процесу контролю надасть змогу зменшити вплив людського фактора та оптимізувати роботу персоналу.
- Прототип системи має бути модульним, що спрощує налаштування та оновлення його окремих компонентів. Також, система повинна мати здатність до масштабування, щоб задовольняти потреби різних об'єктів контролю та різних складності завдань.

Існують популярні платформи як Arduino, Raspberry Pi та ESP8266. Arduino, Raspberry Pi та ESP8266 – це популярні відкриті платформи для розроблення електронних пристроїв та IoT-проектів. Arduino є простим у використанні, має багато додаткових модулів, але менш потужний за Raspberry Pi та ESP8266. В роботі [7] розглянуто основи розроблення та прототипування біомедичних пристроїв і конструкцій із використанням платформ Arduino та Raspberry Pi. Автори наводять загальні поняття біомедичної інженерії, процеси прототипування та тестування, а також висві-

глюють важливість цих процесів у царині охорони здоров'я.

Raspberry Pi – мініатюрний комп'ютер з операційною системою та можливістю підтримки багатозадачності, але ця платформа споживає більше енергії порівняно з Arduino. ESP8266 має вбудований Wi-Fi модуль та низьке споживання енергії, але може виявитись складнішим у використанні.

Одним з привабливих варіантів розроблення засобів ВСК є використання платформи Red Pitaya. Вона має суттєві переваги перед іншими платформами: має високу швидкість обробки, точність аналогово-цифрових перетворювачів та гнучкість завдяки програмованому логічному пристрою (FPGA). Ці характеристики дають підстави розглядати Red Pitaya як перспективну платформу для розроблення прототипу вихрострумів систем НК.

Унікальні можливості платформи Red Pitaya зацікавили фахівців з різних напрямів наукових досліджень. Експериментальна установка, описана дослідниками S. Hannig, J. Mielke, J. Fenske, M. Misera, N. Beev, C. Ospelkaus та P. Schmidt [8] використовує плату Red Pitaya в якості швидкого цифрового пропорційно-інтегрального регулятора, що діє на дзеркало й встановлене на швидкому п'єзоприводі. Дана установка призначена для проведення сучасних експериментів із квантової оптики.

Плати Red Pitaya використовуються у експериментальній установці, яка досліджує ядерний синтез [9]. Науковці із університету Падуї використовують її в проєкті SPIDER. На даний момент в експериментальній установці використовуються 12 плат, які здійснюють діагностичні вимірювання в даному проєкті.

Передові університети світу дають змогу віддаленого навчання. Так звані системи «Віртуальні кампуси» дають змогу поширювати навчальний матеріал та є засобом комунікації між студентами. Але виникають проблеми проведення лабораторних занять. Науковці з іспанського університету Екстрамадури запропонували використання віддалених лабораторій на основі плат Red Pitaya [10].

Науковці із Принстонського університету розробили апаратний і програмний інструментарій STEMlab на основі плати Red Pitaya для виконання різних типів вимірювань ядерних боєголовок або секретних компонентів ядерних боєголовок [11]. Такі вимірювальні системи мають вирішальне значення для перевірки майбутніх угод про контроль над озброєннями.

Інститут Джеймса Франка та кафедра фізики Чиказького університету використали плату Red Pitaya в новому підході розширення смуги пропускання механічної системи, керованої зворотним зв'язком, шляхом цифрового заглушення акустичних резонансів (полосів) і антирезонансів (нулів) [12]. Дані дослідження направлені на вирішення проблем стабілізації у оптичних резонаторах, діо-

дних лазерах із зовнішнім резонатором, скануючих тунельних мікроскопах і т.п.

На сьогодні платформа Red Pitaya є популярною апаратною платформою для прототипування, навчання і створення різноманітних проєктів. На відміну від інших плат, Red Pitaya має широкий вибір мов програмування високого рівня та простий спосіб завантаження програм.

Мета статті полягає в проведенні аналізу апаратної складової платформи Red Pitaya за функціональними можливостями й технічними характеристиками, та визначенні перспектив її застосування в технології прототипування автоматизованих систем вихрострумів контролю.

### Виклад основного матеріалу

Плати Red Pitaya зараз є важливим компонентом багатьох науково-дослідницьких проєктів у галузі фізики. Науковці та інженери-дослідники в автомобільній, аерокосмічній промисловості, передових дослідженнях і телекомунікаціях цінують їх за відкритий код, гнучкість, продуктивність та малий форм-фактор. Плати Red Pitaya представляють собою програмно-апаратну платформу, яка може бути використана для побудови вимірювальних інструментів, створення прототипів [13]. Загальний вигляд плати Red Pitaya наведено на рис. 1.

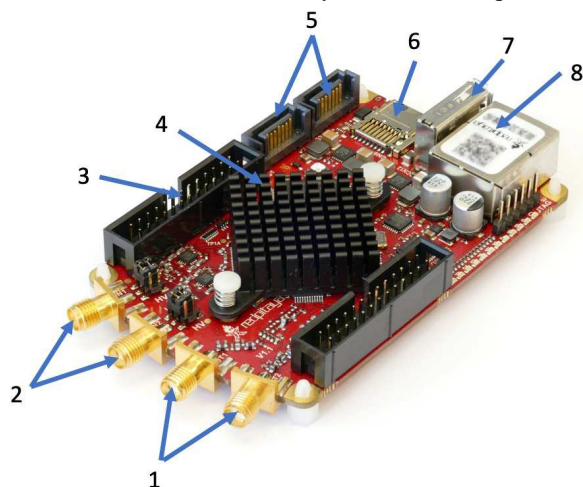


Рис. 1. Платформа Red Pitaya, де: 1 – ВЧ ЦАП 125Msps 14bit; 2 – ВЧ АЦП 125Msps 14bit; 3 – Інтерфейс розширення (GPIO, I2C, SPI, UART, зовн. синхр.); 4 – ARM Cortex A9 + ПЛІС; 5 – SATA інтерфейс; 6 – Micro SD картка; 7 – USB; 8 – Ethernet інтерфейс

Red Pitaya може використовуватися як для створення автономних приладів, так і підключатися до різного програмного забезпечення ПК. Керування платами Red Pitaya може здійснюватися за допомогою середовищ програмування Matlab, SciLab, Labview або Python. Багато вимірювальних інструментів вже створено офіційно компанією-розробником, зокрема осцилограф, генератор сигналів, аналізатор спектру, LRC-метр, логічний аналізатор, Боде аналізатор. Архітектура плати Red

Pitaya побудована на чіпі Xilinx Zynq-7010. Цей чіп є системою на кристалі (SoC), що складається з двох підсистем: процесорної підсистеми та програмованої логічної підсистеми (рис. 2). Ця архітектура забезпечує з'єднання програмованої логіки з процесорною системою на кристалі, що дозволяє виконувати завдання швидко та ефективно.

Процесорна підсистема містить двоядерний процесор ARM Cortex-A9 із тактовою частотою 667 МГц, який використовується для виконання операцій, що вимагають високого рівня програмної обробки, таких як операції з даними, управління пам'яттю та комунікація з іншими пристроями. Процесорна підсистема також містить пам'ять DDR3, яка використовується для зберігання програмного коду та даних. Крім того, PS підсистема має контролер Ethernet, контролер USB та UART для забезпечення з'єднання з різними зовнішніми пристроями.

Програмована логічна підсистема реалізована на базі FPGA. Цей блок дозволяє виконувати завдання, які вимагають високої швидкості обробки даних, таких як сигнальні поля та зображення. Крім того, програмований логічний блок дозволяє забезпечувати з'єднання з різними зовнішніми пристроями, такими як дисплеї, датчики та інші.

Плата Red Pitaya має наступні технічні характеристики:

1. ПЛІС: Red Pitaya має ПЛІС (програмовану логічну інтегральну схему) Xilinx Zynq-7010, яку можна використовувати для оброблення цифрових сигналів, контролю в реальному часі та інших застосунків.
2. АЦП та ЦАП: Red Pitaya має два 14-бітних аналого-цифрових перетворювачі та два 14-бітних цифро-аналогових перетворювачі, що дають змогу отримувати високороздільну вибірку та генерацію сигналів.

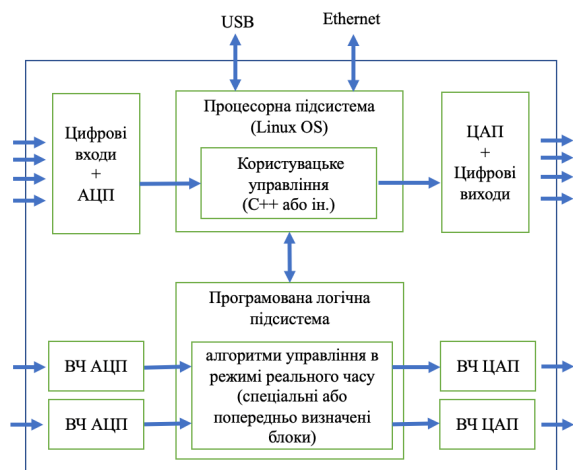


Рис. 2. Архітектура плати Red Pitaya

3. Периферія: Red Pitaya має кілька варіантів зв'язку, включаючи Ethernet, USB та Wi-Fi. Це дає змогу легко інтегрувати платформу в існуючі інформаційно-телекомунікаційні мережі та системи.

4. Підтримка програмного забезпечення: Red Pitaya підтримує кілька середовищ програмування, включаючи MATLAB, Python, C/C++ та LabVIEW. Це надає змогу легко розробляти та реалізовувати власні застосунки.
5. Розмір та потужність: Red Pitaya має компактний розмір 11 см x 7 см, що дає можливість легко інтегрувати її в різноманітні пристрої та системи. Ця платформа також дуже потужна, маючи чотириядерний процесор ARM Cortex-A9 з тактовою частотою 667 МГц та 512 Мб оперативної пам'яті.
6. Відкритий код: Red Pitaya є платформою з відкритим вихідним кодом. Це означає, що її апаратне та програмне забезпечення є безкоштовно доступними і дозволяє налаштовувати та модифікувати платформу для відповідності конкретним потребам.

Для роботи плати попередньо встановлюється операційна система Red Pitaya OS на зовнішній накопичувач формату MicroSD, тому програматор для налаштування програмних кодів не потрібний. Плати програмуються через Ethernet-порт завдяки наявності інтерфейсу в чіпі Zynq-7000. Таке рішення надає змогу одразу підключатися до платформи без встановлення додаткових драйверів. Плати дозволяють використовувати більшість виводів чіпу у зовнішніх схемах.

На сьогодні для Red Pitaya є невелика кількість модулів розширення: логічний аналізатор, LRC-метр, ґрунтопроникний радар, плата відеовиходу HDMI, ЕКГ-модуль (AD8232), спектрометр. Також є модуль плати для підключення Arduino сумісних модулів та відкриває велику кількість модулів розширення, що містять різні сенсори: температури (DS18B20) та тиску (BMP180); MEMS – сенсори руху: акселерометри (ADXL345) та гіроскопи (L3G4200D); дисплеї (LCD4884); крокові двигуни; GSM і GPS.

За допомогою вбудованого веб-застосунку "Jupyter Notebook" можна розробляти програмне забезпечення для прототипу, що дозволяє:

- створювати документи, які містять код, рівняння, графіки та пояснювальний текст;
- керувати та відслідковувати всі параметри апаратної частини;
- використовувати сторонні бібліотеки математичного опрацювання вхідних сигналів, числового та статистичного моделювання, машинного навчання та багато іншого.

Веб-застосунок дозволяє інженерам-дослідникам легко використовувати весь потенціал апаратної частини платформи зосередившись на написанні програмного забезпечення.

Застосунок використовує мову програмування Python, що забезпечує доступ до всіх апаратних функцій платформи: цифрові входи/виходи; пові-



льні та швидкісні ЦАП/АЦП; вбудовані світлодіоди; цифрові інтерфейси (UART, I2C, SPI).

Плати Red Pitaya використовуються там, де автоматизовані системи вихрострумowego контролю вимагають повільного або швидкого отримання сигналу, генерування, опрацювання сигналів. У комбінації із FPGA можна виконувати всі операції у реальному часі.

Прототип системи автоматизованого контролю із застосуванням платформи Red Pitaya складається з наступних компонентів (рис. 3):

1. Двокоординатний сканер, що дозволяє здійснювати переміщення вихрострумowego перетворювача по площині. Сканер може бути оснащений датчиками положення, які дозволяють визначати координати вихрострумowego перетворювача.
2. Вихрострумовой перетворювач, який використовується для неруйнівного контролю електропровідних матеріалів.
3. Персональний комп'ютер (ПК), який використовується для контролю та обробки даних. ПК може бути підключений до платформи Red Pitaya за допомогою Ethernet-протоколу.
4. Платформа Red Pitaya, яка використовується як аналізатор сигналів від вихрострумowego перетворювача. Платформа може бути підключена до ПК за допомогою Ethernet-протоколу та може забезпечувати високу швидкість передачі даних.
5. Програмне забезпечення, яке дозволяє контролювати сканер та вихрострумовой перетворювач, отримувати та обробляти дані від платформи Red Pitaya та здійснювати візуалізацію результатів контролю.

Принцип роботи системи автоматизованого контролю полягає в тому, що сканер переміщує

вихрострумовой перетворювач по площині, отримуючи дані від нього за допомогою платформи Red Pitaya. Дані, за допомогою Ethernet-протоколу, передаються на ПК, де вони обробляються та візуалізуються. Програмне забезпечення дає змогу контролювати сканер та вихрострумовой перетворювач, налаштувати параметри контролю та здійснювати запис та збереження результатів.

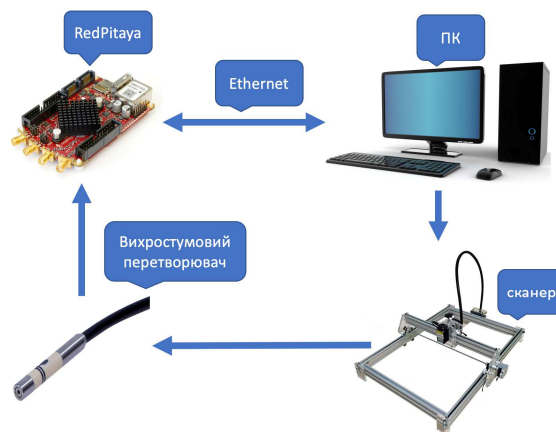


Рис. 3. Прототип системи автоматизованого контролю із застосуванням платформи Red Pitaya

### Можливості вторинного оброблення сигналу за допомогою застосунку Jupyter Notebook

Веб-застосунок має широкий набір основного функціоналу та додаткових можливостей: редактор вбудований в екосистему плати; для роботи не потрібна наявність інтернету; зручний редактор коду; містить вбудовану документацію; має набір попередньо сформованих прикладів для роботи із апаратною частиною платформи (рис. 4). Є можливість додавати візуалізацію, пояснювальний текст, математичні формули.

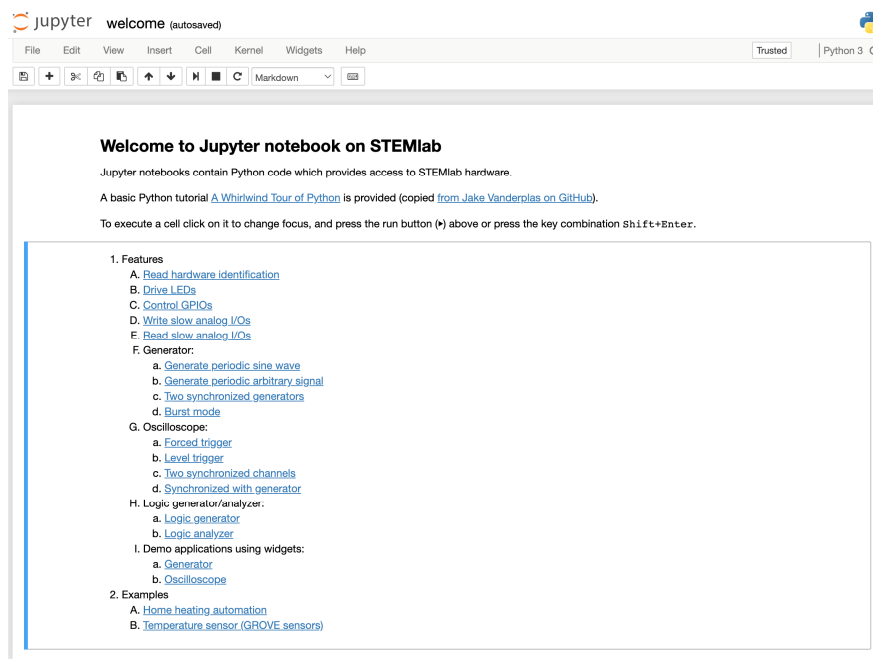


Рис. 4. Загальний інтерфейс Jupyter Notebook

Дискретне перетворення Гільберта є важливим інструментом в аналізі сигналів, який дає змогу отримати аналітичний сигнал з вихідного реального сигналу [14, 15]. Використання Jupyter Notebook спрощує роботу з перетворенням Гільберта завдяки візуалізації даних і підтримці різних бібліотек оброблення сигналів, таких як SciPy.

Для початку роботи необхідно підключити бібліотеки для обробки сигналів та візуалізації даних. NumPy використовується для операцій з масивами даних, matplotlib.pyplot – для візуалізації графіків, а scipy.signal.hilbert – для застосування перетворення Гільберта до вихідного сигналу. Імпортування цих бібліотек забезпечує можливість

використання їх функцій в коді Jupyter Notebook (рис. 5).

*Створення синтетичного сигналу.* У наведеному прикладі синтетичний сигнал – це синусоїда з заданими параметрами: частотою дискретизації, частотою сигналу, амплітудою та тривалістю. Створений сигнал візуалізується за допомогою графіка, що допомагає зрозуміти його форму та особливості перед опрацюванням (рис. 6).

*Застосування перетворення Гільберта.* Це перетворення дає змогу отримати аналітичний сигнал, та визначити на цій основі дискретні характеристики сигналу – обвідну та фазу. Це важливий крок у вторинному опрацюванні сигналу (рис. 7).

```
In [1]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import hilbert, chirp
```

Рис. 5. Підключення необхідних бібліотек

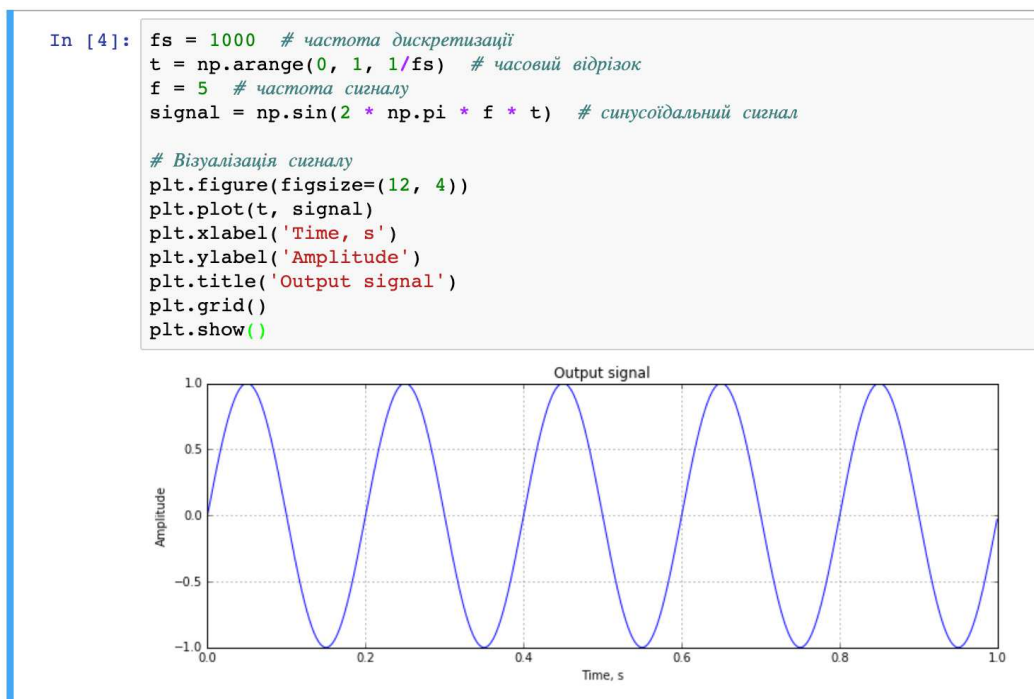


Рис. 6. Створення вхідного сигналу

```
In [5]: analytic_signal = hilbert(signal)
```

Рис. 7. Застосування перетворення Гільберта

*Обчислення амплітуди та фази аналітичного сигналу.* Цей крок полягає в обчисленні миттєвих значень обвідної та фази аналітичного сигналу. Обвідна відображає зміни амплітуди сигналу в часі, а миттєва фаза – зміни фази сигналу. Ці функції важливі для розуміння характеристик сигналу та їх зв'язку з характеристиками виробу та дефектів в ньому. Вони можуть бути використані для

виявлення аномалій, оцінки стану об'єкта або розпізнавання сигналів (рис 8.).

*Візуалізація результатів.* Візуалізація результатів полягає в побудові графіків миттєвих значень обвідної та фази аналітичного сигналу. Ці графіки допомагають користувачеві краще зрозуміти характеристики вихідного сигналу та результати перетворення Гільберта. Візуалізація даних є важливим інструментом в аналізі сигналів, оскільки вона дає

зможу контролювати якість опрацювання сигналів та виявити можливі аномалії або особливості сиг-

налу (рис. 9).

```
In [6]: amplitude_envelope = np.abs(analytic_signal)
instantaneous_phase = np.unwrap(np.angle(analytic_signal))
```

Рис. 8. Обчислення амплітуди та фази аналітичного сигналу

```
In [10]: # Амплітудна огибаюча
plt.figure(figsize=(12, 4))
plt.plot(t, signal, label='Output signal')
plt.plot(t, amplitude_envelope, label='Envelope', linestyle='--')
plt.xlabel('Time, s')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

# Миттєва фаза
plt.figure(figsize=(12, 4))
plt.plot(t, instantaneous_phase)
plt.xlabel('Time, s')
plt.ylabel('Phase, rad')
plt.grid()
plt.show()
```

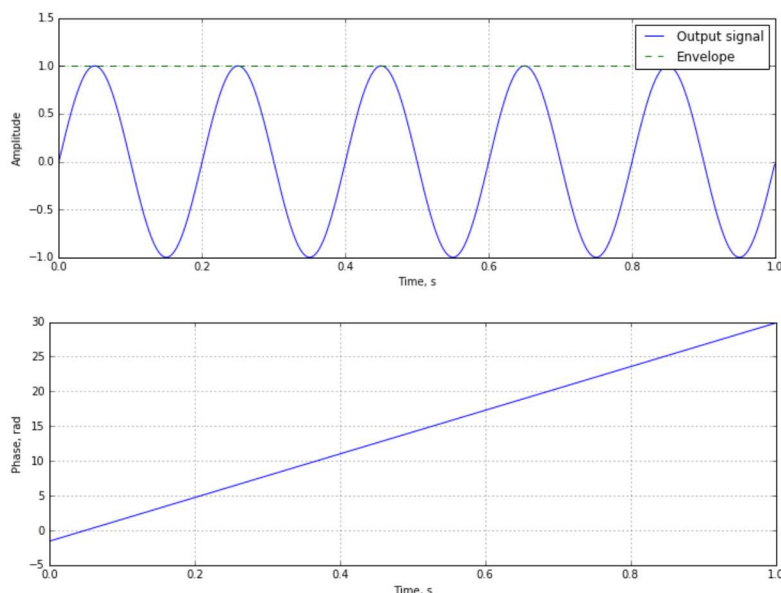


Рис. 9. Візуалізація отриманих результатів

Усі ці кроки разом становлять процес вторинного опрацювання сигналу за допомогою перетворення Гільберта в Jupyter Notebook. Вони дають можливість користувачеві швидко та ефективно обробити сигнал та оцінити його характеристики. Застосунок Jupyter Notebook є зручним інструментом для такого аналізу, оскільки надає змогу візуалізувати дані, використовувати різні бібліотеки та легко поширювати результати для користування.

**Переваги Jupyter Notebook:** не потрібно завантажувати будь-яке середовище розробки; можливість зміни мови програмування (Python, R, C#, MatLab, C++); безпосередня візуалізація; безкоштовний; багато типових прикладів вбудовані в платформу (можна їх змінювати і допису-

вати); дозволяє ділитися проектами з іншими дослідниками; простий інтерфейс.

**Обмеження Jupyter Notebook:** низька швидкість виконання; не підходять для комерційних проектів; мала продуктивність; проблеми із асинхронним кодом. Проте ці обмеження не є суттєвими при створенні прототипів автоматизованих систем вихрострумового контролю.

За результатами виконаного дослідження можна зробити висновок, що апаратно-програмні засоби вихрострумового контролю на основі поєднання можливостей платформи Red Pitaya та сучасних програмних засобів дає змогу реалізувати технологію прототипування для створення інноваційних засобів ВСК.

Подальші дослідження застосування платформи Red Pitaya у технології прототипування автома-

тиваних вихрострумів систем будуть спрямовані на розв'язання наступних задач:

1. Розширення апаратних можливостей платформи Red Pitaya внаслідок розроблення інтерфейсних плат, які надають змогу підключати багатоелементні вихрострумові перетворювачі та розширити динамічний діапазон аналізованих сигналів.
2. Адаптація сучасних бездротових технологій (Wi-Fi, Bluetooth) до системи вихрострумів контролю, що відкриває нові перспективи для автоматизації, дистанційного керування процесом контролю та його інтеграції в технологічний процес виробництва.
3. Застосування штучного інтелекту для вирішення завдань класифікації дефектів та оцінювання їх параметрів у вихрострумів дефектоскопії.

### Висновки

Проведені дослідження дозволили виявити наступне:

1. Задача прототипування засобів вихрострумів неруйнівного контролю важлива та актуальна, оскільки дає змогу розробникам швидко та ефективно створювати та налагоджувати системи в статичному та динамічному режимах роботи системи.
2. Платформа Red Pitaya вибрана для прототипування автоматизованих систем вихрострумів неруйнівного контролю через її багату функціональність, надійність та доступність, що робить її зручним інструментом для реалізації таких проєктів.
3. Запропонована архітектура прототипу автоматизованої системи враховує різні потреби ринку та дає змогу адаптуватись до різних сценаріїв застосування.
4. Jupyter Notebook слугує зручним інструментом для створення програмних продуктів, полегшуючи процес розробки та налагодження програм опрацювання сигналів в прототипі автоматизованої системи вихрострумів контролю об'єктів.

### Література

- [1] А. О. Дьоміна, "Особенности прототипирования объектно-ориентированных программных систем", *Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки*, т. 138, с. 68-75, 2012. [Online]. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/NaUKMAkn\\_2012\\_13\\_8\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/NaUKMAkn_2012_13_8_15).
- [2] U. Godbole and A. Gokhale, "Eddy Current Inspection in Aircraft Industry," in *Proc. National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, Hyderabad, 7-9 Dec. 2006. [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/nde-india2006/files/tp-59-pap.pdf>.
- [3] C.-C. Chou, S.-Y. Hsiao, J.-Z. Feng, et al., "A tabletop experiment for speed of light

measurement using a Red Pitaya STEMlab board," *American Journal of Physics*, vol. 91, no. 3, pp. 206–213, 2023. DOI: 10.1119/5.0099720.

- [4] J.-S. Jwo, C.-S. Lin, C.-H. Lee, L. Zhang, and S.-M. Huang, "Intelligent System for Railway Wheelset Press-Fit Inspection Using Deep Learning", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, p. 8243, Sep. 2021, DOI: 10.3390/app11178243.
- [5] M. Raj, D. Mallik, S. Bansal, et al., "Non-Destructive Testing and Inspection of Rails at JSPL – Ensuring Safety and Reliability," in *Proc. 18th World Conf. on Nondestructive Testing*, Durban, 2012. [Online]. Available: [www.ndt.net](http://www.ndt.net).
- [6] Z. Song, T. Yamada, H. Shitara, and Y. Takemura, "Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing", *J. of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 3, no. 12, pp. 546–550, 2011. DOI: 10.4236/jemaa.2011.312082.
- [7] А. В. Пархоменко, О. М. Гладкова та А. В. Пархоменко, *Прототипування біомедичних пристроїв та конструкцій: навчальний посібник*. Житомир, Україна: ПП «Свро-Волинь», 2021.
- [8] S. Hannig, J. Mielke, J. A. Fenske et al., "A highly stable monolithic enhancement cavity for second harmonic generation in the ultraviolet", *Review of Scientific Instruments*, vol. 89, no. 1, p. 013106, 2018. DOI: 10.1063/1.5005515.
- [9] A. Rigoni, C. Taliercio, A. Luchetta, et al., "Red Pitaya applications at the NBTF beam source SPIDER," in *13th Technical Meeting on Plasma Control Systems, Data Management and Remote Experiments in Fusion Research*, Vienna, Austria, 5-8 July 2021.
- [10] C. J. García-Orellana, M. Macías-Macías, H. González-Velasco, A. García-Manso and R. Gallardo-Caballero, "Remote laboratory experiments of Analog Electronics based on 'Red Pitaya'", in *2016 XII Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAEE)*, Seville, Spain, 22–24 June 2016. DOI: 10.1109/taee.2016.7528244.
- [11] M. Kütt, M. Götsche, and A. Glaser, "Information barrier experimental: Toward a trusted and open-source computing platform for nuclear warhead verification", *Measurement*, vol. 114, pp. 185–190, 2018. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.09.014.
- [12] G. D'Angelo, M. Laracca, and S. Rampone, "Automated Eddy Current non-destructive testing through low definition lissajous figure", in *2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, Florence, Italy, 22–23 June 2016.
- [13] STEMlab 125-14 Starter Kit. [Online]. Available: <https://redpitaya.com/product/stemlab-125-14/>



- [14] Z. Mei, Y. Kuts, O. Kochan, I. Lysenko, O. Levchenko, and H. Vlach-Vyhrynovska, "Using Signal Phase in Computerized Systems of Non-destructive Testing", *Measurement Science Review*, vol. 22, no. 1, pp. 32-43, 2022. DOI: 10.2478/msr-2022-0004
- [15] Ю. В. Куц, В. М. Учанін, Ю. Ю. Лисенко та О. Е. Левченко, "Застосування перетворення

Гільберта для аналізу сигналів автоматизованого вихрострумowego контролю. Частина 1. Теоретичні аспекти використання перетворення Гільберта у вихрострумowego контролі", *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, № 3, с. 7-13, 2021. DOI: 10.37434/tdnk2021.03.01.

UDC 620.179.16:681.5.017

**O. Levchenko***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***APPLICATION OF THE RED PITAYA PLATFORM IN THE TECHNOLOGY OF PROTOTYPING AUTOMATED EDDY CURRENT TESTING SYSTEMS**

Automated eddy current non-destructive testing has an important role in the quality inspection system for products made of conductive materials both at the production stage and during their operation. The appearance of novel alloys, the complexity of product geometry and inspection conditions, and the increased requirements for the reliability and accuracy of inspection results stimulate the acceleration process of creating new eddy current inspection tools. The technology of prototyping makes it possible to solve this problem. The purpose of the article is to review the functionality and technical characteristics of Red Pitaya for use in the technology of prototyping eddy current inspection, as well as to create a prototype architecture of an automated eddy current inspection system based on it.

The choice of the Red Pitaya platform as a convenient tool for prototyping automated systems was made due to its functionality, reliability, and availability. In general, the article highlights the advantages and prospects of using the Red Pitaya platform in the prototyping of automated eddy current non-destructive testing systems. The aspects of the Red Pitaya hardware and its capabilities for expanding the functionality, which allows to create highly efficient and flexible control systems, are considered in detail. The compatibility of Red Pitaya with other devices and accessories is considered, which significantly increases its versatility and adaptability to various requirements and applications.

The article highlights the importance of using the Jupyter Notebook application in combination with Red Pitaya as a convenient tool for software development. This helps to facilitate the process of creating and programmatically implementing complex signal processing algorithms in eddy current control systems, and provides flexibility in creating new software products.

Modern trends and prospects for the development of eddy current testing, market needs, and the ability to adapt to different application scenarios are taken into account in the proposed architecture of the prototype automated eddy current testing system.

**Keywords:** eddy current non-destructive systems; Red Pitaya; prototyping; design; automation.

*Надійшла до редакції  
15 травня 2023 року*

*Рецензовано  
24 червня 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).