

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-14>

УДК 004.005:004.9

**ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ ЮРІЙ**

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-1248-3615>e-mail: [y.dobrovolsky@chnu.edu.ua](mailto:y.dobrovolsky@chnu.edu.ua)**ПРОХОРОВ ПАВЛО**

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

<https://orcid.org/0009-0008-0965-5771>e-mail: [prokhorov.pavlo@chnu.edu.ua](mailto:prokhorov.pavlo@chnu.edu.ua)**ПАВЛЮЧЕНКО ОЛЕГ**

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

e-mail: [oleh.pavl@gmail.com](mailto:oleh.pavl@gmail.com)**МАКАРУК ОЛЕГ**

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

e-mail: [makaruk.oleh@chnu.edu.ua](mailto:makaruk.oleh@chnu.edu.ua)

## РОЗРОБКА ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ ВИХІДНОГО СТРУМУ ФОТОПРИЙМАЧА ПРОГРАМНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ КОДУ ДЛЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ РІЗНИХ АРХІТЕКТУР

У даній статті наведено програмний метод рішення задачі лінеаризації вихідного струму фотоприймача за межами динамічного діапазону із використанням мікроконтролерів, за умови що рішення може бути розгорнуто на різних архітектурах мікроконтролерів для великої кількості різних типів фотоприймачів, при цьому для кожного з таких фотоприймачів може бути надана та оброблена будь-яка кількість емпіричних вимірів їх характеристик. Для побудови такої моделі пропонується розробка платформи, що може бути розгорнута на окремих обчислювальних потужностях та задачами якої буде обробка заданої множини результатів вимірів, отриманих з реальних результатів роботи фотоприймача, на основі чого буде здійснено розрахунок математичної моделі залежності вихідних значень струму фотоприймача від вхідних значень оптичного сигналу та подальша генерація коду для будь-якої з підтримуваних архітектур мікроконтролерів. У статті також розглядаються специфічні особливості побудови та розрахунку математичної функції лінеаризації фотоприймача, а саме апроксимацію за допомогою кусково-заданої функції вихідної величини струму фотоприймача у залежності від потужності світлового потоку, а також визначення точок переходу цієї функції, які відомі також як вузли. Окрім того розглядається питання реалізації алгоритмів та способів перетворення обчислених моделей з окремо взятого обчислювального середовища у низкорівневий код, що може бути завантажено та виконано обчислювальним середовищем мікроконтролера певної архітектури. Наведена у статті платформа дозволяє полегшити облік та обробку експериментальних даних про характеристики фотоприймачів та може бути впроваджена у науково-дослідницьких лабораторіях та/або виробництвах.

**Ключові слова:** фотоприймачі; динамічний діапазон; мікроконтролери; генерація коду; програмна інженерія

**DOBROVOLSKY YURIY****PROKHOROV PAVLO****PAVLIUCHENKO OLEH****MAKARUK OLEG**

Chernivtsi National University named after Yu. Fedkovycha

## PLATFORM DEVELOPMENT FOR PHOTODETECTOR LINEARIZATION BY SOFTWARE METHOD USING CODE GENERATION FOR MICROCONTROLLERS OF DIFFERENT HARDWARE ARCHITECTURES

Article describes a software method for solving the problem of linearization of the output current of the photodetector outside the dynamic range using microcontrollers, provided that the solution can be deployed on different microcontroller architectures for a large number of different types of photodetectors, while any number of experimental measurements of their characteristics can be entered and processed for each of these photodetectors. Described approach offers platform development that can be deployed on separate computing capacities, the tasks of which will be to process a given number of measurement results taken from the empirical results of photodetector output current measurements, on the basis of which a mathematical model of the dependence of the output current values of the photometer from the input values of the optical signal will be evaluated, with further generation of the source code for any of the supported microcontroller architectures. The article also considers the specificity of development and evaluation of linearization function for photodetector, namely the approximation of the piecewise-determined function of output current value of the photodetector with linear and non-linear part, depending on the external power supplied by the light flux, as well as the definition of the boundary of these parts, also known as a knot. In addition, the implementation of algorithms and approaches to convert calculated mathematical models from a single high-level computing environment on a certain computing station into low-level software code are considered, include further loading and execution by the internal computing environment of a microcontroller of a certain architecture. The platform described in the article allows to facilitate the recording and processing of experimental data on the characteristics of photographic devices and can be implemented in research laboratories and/or production.

**Keywords:** photodetectors; dynamic range; microcontrollers; code generation; software engineering

Стаття надійшла до редакції / Received 09.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 06.08.2025

### Постановка проблеми

При вирішенні багатьох технічних задач від фотоприймача, як і від більшості сенсорів, може знадобитись збереження лінійної залежності між вхідними і вихідними значеннями на певних діапазонах. При цьому у деяких випадках може знадобитись збереження такої лінеаризації за межами стандартних параметрів виробника. Ця задача лінеаризації є широко відомою і серед поширених підходів до її рішення розрізняють апаратні, програмні і різні їх комбінації [1]. Розглянутий нами комбінований підхід заснований на побудові електронного ланцюга з підсилювачем певної конфігурації, у якому вихідне значення струму фотоприймача обробляється мікроконтролером, що у свою чергу дозволяє корегувати загальне вихідне значення струму. При цьому варто враховувати, що так як обчислювальні ресурси мікроконтролерів є досить обмеженими у порівнянні зі звичайними комп'ютерами, а алгоритми що дозволяють розрахувати математичну модель необхідних додаткових значень вимагають великих, відносно мікроконтролерів, обчислювальних ресурсів, то логічним є рішення у вигляді платформи, у якій розрахунок параметрів математичної моделі та її виконання є розділеними. Таким чином, пропонується нами платформа не тільки реалізує такий поділ, а й дозволяє розділити не тільки розрахунки математичних моделей під різні архітектури мікроконтролерів, але і генерацію низькорівневого коду під кожен з архітектур.

### Аналіз останніх джерел

На даний момент існують різні види фотоприймачів залежно від матеріалів виготовлення та внутрішньої конструкції, детальна класифікація сучасних видів розглянута у [2].

Задача лінеаризації сенсорів у широкому сенсі досить добре описана у ряді джерел [3, 4], при цьому лінеаризація саме фотоприймачів має свої фізичні особливості. Виходячи з фізичних особливостей процесів у фотоприймачі можна відзначити що функція вихідного фотоструму є кусково-визначуваною в області вхідних значень потужності оптичного сигналу як у межах динамічного діапазону, так і за ним. Отже, завдання зводиться до визначення апроксимованої функції, яка може бути представлена, наприклад, у вигляді одного з регресійних сплайнів, за умови, що відоме число вузлів (точок, у яких вигляд функції змінюється), а їх конкретні значення необхідно обчислити виходячи з емпіричних даних. Для вирішення такого завдання динамічного визначення вузлів можуть бути застосовані різні алгоритми, починаючи від відносно простих [5], і до відносно складних, як наприклад використання сплайнової регресії [6, 7].

Оскільки існуючі на ринку мікроконтролери мають різні архітектури (ESP32, AVR, STM32 та ін.) [8], то відповідно необхідний низькорівневий код під кожен з архітектур буде різним. Крім того, необхідно врахувати такі, загальні для будь-яких обчислень на комп'ютерах, особливості:

1. Кожна архітектура має свій набір інструкцій, при цьому деякі інструкції для різних архітектур можуть мати як інший принцип дії, так і взагалі бути відсутніми.
2. Оптимальна реалізація математичних функцій повинна враховувати різні особливості, як наприклад засоби оптимізації кожної конкретної архітектури, або як у певній архітектурі реалізована робота з числами з рухомою комою, що наведено у [9, 10].

Переважаюча кількість мікроконтролерів не має апаратних характеристик, які дозволили б динамічно обчислювати значення з алгоритмів апроксимації, згаданих раніше. Це призводить до того, що регресійні/апроксимаційні значення повинні бути попередньо розраховані на потужніших обчислювальних серверах, після чого перенесені на мікроконтролер у вигляді вже прорахованої статичної таблиці, що більш відомо як підхід "Look Up Table" [11].

Таким чином, з технічної точки зору наше завдання полягає в тому, щоб на основі моделі, розрахованої за допомогою мови високого рівня, реалізувати оптимальну генерацію низькорівневого або гібридного (високорівневого з низькорівневими вставками) коду для мікроконтролерів різних архітектур. Задачі та підходи такої кодогенерації широко розглядається у теорії компіляторів і мов програмування [12].

Підхід що дозволяє розділити динамічний розрахунок математичних моделей та їх безпосереднє виконання на мікроконтролері не є достатньо розглянутим, особливо з точки зору підходів програмної інженерії до розробки єдиної платформи, у якій з одного боку розрахункові частини можуть бути імплементовані не тільки у вигляді статичних серверів, а й гібридних та/або хмарних обчислень, а з іншого боку реалізована генерація низькорівневого коду під конкретну архітектуру мікроконтролера по запиту з урахуванням обчислених параметрів під певний екземпляр фотоприймача.

**Метою роботи є:** сформулювати підхід до реалізації платформи яка дозволяє ефективно організовувати, зберігати, обробляти та виконувати лінеаризацію для великої кількості різноманітних фотоприймачів за допомогою широкого діапазону різних мікроконтролерів.

### Виклад основного матеріалу

З математичної точки зору пропонується нами підхід (наведено на рис. 1) полягає у формуванні та розрахунку функції необхідних додаткових значень залежно від вхідного оптичного сигналу, вираженого, наприклад, у вигляді потужності світлового потоку, що вимірюється у мкВт/см<sup>2</sup>.

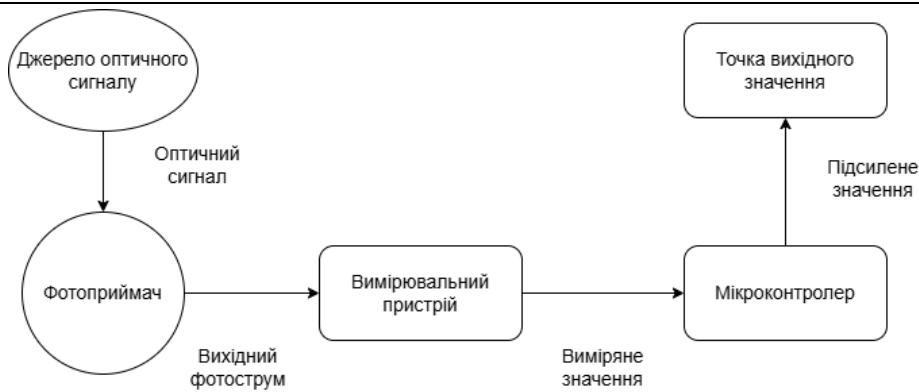


Рис. 1. Схема лінеаризації за допомогою підсилення мікроконтролером

Під лінійністю фотоприймача розуміється лінійно пропорційне вихідне значення у вигляді значень фотоструму або напруги в залежності від вхідного оптичного сигналу. Лінійність вихідного значення є необхідною характеристикою для фотоприймача, так як він повинен переробляти оптичний вхідний сигнал певної довжини хвилі у вихідний електричний з мінімальним числом спотворень. На практиці, незважаючи на те, що в певних діапазонах така лінійність для фотоприймачів спостерігається, реальний діапазон такої лінійності обмежений, і починаючи з певних значень оптичного сигналу вихідне значення струму та/або напруги перестає бути лінійно залежною величиною. Крім того, починаючи з певного значення оптичного сигналу, подальший приріст потужності цього сигналу призводить до дуже малого значення збільшення вихідного значення. Таке значення оптичного сигналу називається точкою сатурації. Множина всіх можливих вхідних значень оптичного сигналу від мінімально можливого з лінійною залежністю до точки сатурації називається Динамічним Діапазоном (Dynamic Range, DR) і визначається через можливі вхідні значення оптичного сигналу, вихідні значення для яких пролягають від крайньої точки Еквівалентної Потужності Шуму (Noise Equivalent Power). NEP визначається як:

$$NTP = \frac{ms(i_n)}{R}, \quad (1)$$

де  $ms(i_n)$  - середньоквадратичне значення шуму при оптичному сигналі з ставленням сигнал/шум (Signal to Noise Ratio, SNR) рівному 1 і коефіцієнту відгуку (responsivity)  $R$ .

Коефіцієнт відгуку (Responsivity,  $R$ ) – параметр фотоприймача, що визначає значення вихідного сигналу залежно від значення оптичного вхідного сигналу. У разі значення вихідного фотоструму залежно від потужності оптичного сигналу визначається як:

$$R = \frac{i_s}{P_s}, \quad (2)$$

Значення точки сатурації (saturation point) визначається через:

$$\frac{di_s}{dP_s} = (1 - \sigma)R, \quad (3)$$

де під  $\sigma$  розуміється значення максимально можливого відхилення від лінійності відповіді фотоприймача.

Наочний графік визначення динамічного діапазону наведено на рис. 2

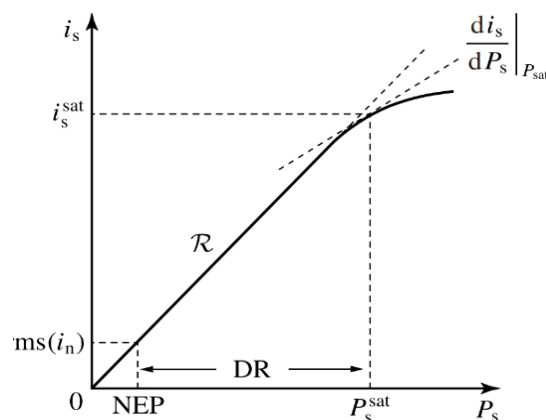


Рис. 2. Графік визначення динамічного діапазону фотоприймача

Так як пропонується нами підхід передбачає достатньо велику кількість вимірювань, то для того щоб виразити цю функціональну модель пропонується зробити це у вигляді нелінійної кусково-визначеної функції, для якої будуть існувати такі вузли:

1. Точка у якій відгук перестає бути лінійним.

2. Точка сатурації.

3. Точка у якій збільшення потужності вхідного сигналу перестає призводити до будь-якої значущої зміни вихідного фотоструму, тобто  $\frac{dI_s}{dP_s} \leq \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – величина похибки виміру.

В результаті виконання перерахованого вище ми повинні отримати додаткову функцію  $D(x)$  від множини значень  $x$  вхідного оптичного сигналу, яка визначається як:

$$D(x) = E(x) - A(x), \quad (4)$$

де  $E(x)$  и  $A(x)$  – лінійна функція виробничих значень та розрахована нами функція для множини вхідних значень відповідно. Функція  $D(x)$  має бути перенесена у вигляді програмного коду для використання в мікроконтролерах.

Розглянемо докладніше технічну реалізацію запропонованого нами рішення:

1. Введення та формування емпіричних даних.

У якості способу введення вимірних даних пропонується реалізувати web-додаток, що працює на основі HTTPS-протоколу, де інженер вручну та/або за допомогою файлу зі значеннями (форматів JSON або CSV) зможе ввести дані за допомогою HTML-форми. Оскільки експериментальні дані структурно є даними у форматі «ключ-значення», отримані з допомогою HTML форми дані пропонується зберігати у спеціальній базі даних. Перевага такого підходу полягає у тому, що це дозволить відокремити збирання та збереження інформації про вимірювання від безпосередньо їх обробки.

Фізичну модель бази даних для зберігання емпіричних вимірів наведено на рис. 3. Варто окремо звернути увагу що модель розроблена таким чином що дозволяє зберігати будь-яку кількість вимірів для великої кількості різноманітних фотоприймачів, для чого у базі виділені окремо таблиці Measurements та Photodetectors відповідно.

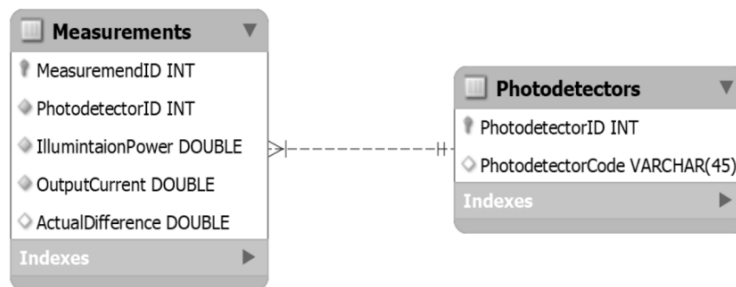


Рис. 3. Фізична модель бази даних емпіричних вимірювань

2. Розрахунок математичної моделі лінеаризації та формування статичного файлу вихідного коду.

Для оптимальної реалізації запропонованої моделі лінеаризації нами пропонується комбінований підхід, суть якого полягає в наступному:

- Розрахувати функціональну залежність та зберегти її вигляд та коефіцієнти як статичну функцію у вихідному файлі цільової мови програмування.

- Використовувати вихідні емпіричні дані для формування структури даних ключ-значення для цільової мови програмування, що буде, по суті, аналогом "Look Up Table" на рівні статичного файлу вихідного коду. Отриману структуру також потрібно зберегти у вихідному файлі.

Таким чином до розрахунку значень по функціональній залежності ми звертатимемося лише у випадку, коли для шуканого вхідного значення не було проведено відповідних вимірювань, а оскільки операція читання з пам'яті очевидно буде швидше динамічного виконання функції розрахунку, то такий підхід дозволить збільшити продуктивність системи в цілому.

Виконати таку реалізацію можна за допомогою мов програмування високого рівня, які мають хорошу підтримку обробки математичних операцій та мають спеціалізовані компоненти для генерування коду (наприклад, Python, Julia та інших).

3. Отриманий на етапі 2 статичний файл з вихідним кодом (приклад наведено на рис. 4) необхідно далі скомпілювати під відповідну платформу/архітектуру, в результаті чого буде отримано бінарний файл, який може бути завантажений безпосередньо на згадку про мікроконтролера і виконуватися на ньому.

```

const int sensorPin = A0;

// Linear lookup table based on amplified photodiode voltage
const int lookupTable[] = {0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500};
const int numEntries = sizeof(lookupTable) / sizeof(lookupTable[0]);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int adcVal = analogRead(sensorPin);

  // Map 0-1023 to 0-10 (index in lookup table)
  int index = map(adcVal, 0, 1023, 0, numEntries - 1);
  index = constrain(index, 0, numEntries - 1);

  int lightLevel = lookupTable[index];

  Serial.print("ADC: ");
  Serial.print(adcVal);
  Serial.print(" | Light Level: ");
  Serial.println(lightLevel);

  delay(500);
}

```

Рис. 4. Приклад згенерованого низькорівневого коду під середовище виконання мікроконтролера

Повна послідовність показаних вище етапів роботи платформи показана на рис. 5

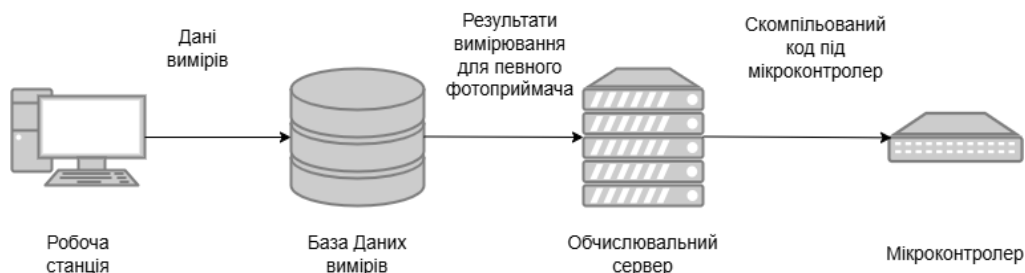


Рис. 5. Етапи роботи реалізованої платформи

### Висновки

Запропонована нами система дозволяє ефективно вирішити завдання лінеаризації фотоприймачів програмним способом із застосуванням мікроконтролерів, за умови обробки великої кількості емпіричних даних у межах Динамічного Діапазону та за ним, а також необхідності генерації вихідного коду моделі реалізації під різні архітектури мікроконтролерів, що може виявитися важливим в умовах промислової та наукової роботи.

Перспективними напрямками подальшого розвитку запропонованої платформи можуть бути дослідження підходів до розподіленого обчислення математичних моделей та більш специфічна оптимізація прорахованих моделей до певних архітектур мікроконтролерів.

### Література

1. Linearization of the sensors characteristics: a review. / Tarikul Islam, S. C. Mukhopadhyay. // International journal of smart sensing and intelligent systems – 2019. – issue 1 vol. 12. DOI: 10.21307/ijssis-2019-007
2. Photodetectors. Materials, Devices and Applications / Bahram Nabet. // Woodhead Publishing – 2023. – 2nd edition.
3. Linear Interval Approximation of Sensor Characteristics with Inflection Points. / Marinov M.B., Nikolov N., Dimitrov S., Ganev B., Nikolov G.T., Stoyanova Y., Todorov T., Kochev L. // Sensors – 2023. – No. 23 (2933). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23062933>

4. Linear Interval Approximation for Smart Sensors and IoT Devices. / Marinov M.B., Nikolov N., Dimitrov S., Todorov T., Stoyanova Y., Nikolov G.T. // *Sensors* – 2022. – No. 22 (949). DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030949>
5. Knot Locating in Piecewise Linear Approximation / Carlos Ugaz, Lanshan Hany, Alvin Lim. // Reprint: [arXiv:1909.03112](https://arxiv.org/abs/1909.03112) [math.OC] – 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.03112>
6. Spline Regression with Automatic Knot Selection / Vivien Goepp, Olivier Bouaziz, Grégory Nuel. // *HAL journal* – 2018. – (01853459)
7. Estimation of knots location and number in the splines regression models using an optimization approach./ Alberto Rodrigues Ferreira // Dissertation, Institute of mathematics and statistics, University of Sao Paulo. – 2022.
8. Microcontrollers: A Comprehensive Overview and Comparative Analysis of Diverse Types / Muhammad Samiullah, Muhammad Zohaib Irfan, Abid Rafique.. // Muhammad Samiullah, Independent publishing - 2023. DOI: <https://doi.org/10.31224/3228>
9. Evolution, Challenges, and Optimization in Computer Architecture: The Role of Reconfigurable Systems. / Jefferson Ederhion, Festus Zindozin, Hillary Owusu, Chukwumazu Ozoomezim, Mmeri Okere, Opeyemi Owolabi, Olalekan Fagbo, Oyetubo Oluwatosin. // Reprint: [arXiv:2412.19234](https://arxiv.org/abs/2412.19234) [cs.AR], 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19234>
10. Real-time C++. / Kormanyos, C. // Springer, Berlin, Heidelberg – 2021. – P. 329–351. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-62996-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62996-3_13)
11. Microcontroller implementation of lookup table-based control functions with special emphasis on sequential control according to IEC 61131-3. / Krisztian Lamar, Peter Zalotay. // *International Journal of Electrical Engineering Education* – 2015. – 52(2). DOI: [10.1177/0020720915571492](https://doi.org/10.1177/0020720915571492)
12. Programming Language Pragmatics. / Michael Scott, Jonathan Aldrich // Morgan Kaufmann – 2025. – 5<sup>th</sup> edition.

#### References

1. Linearization of the sensors characteristics: a review. / Tarikul Islam, S. C. Mukhopadhyay. // *International journal of smart sensing and intelligent systems* – 2019. – issue 1 vol. 12. DOI: 10.21307/ijssis-2019-007
2. Photodetectors. Materials, Devices and Applications / Bahram Nabet. // Woodhead Publishing – 2023. – 2nd edition.
3. Linear Interval Approximation of Sensor Characteristics with Inflection Points. / Marinov M.B., Nikolov N., Dimitrov S., Ganev B., Nikolov G.T., Stoyanova Y., Todorov T., Kochev L. // *Sensors* – 2023. – No. 23 (2933). DOI: <https://doi.org/10.3390/s23062933>
4. Linear Interval Approximation for Smart Sensors and IoT Devices. / Marinov M.B., Nikolov N., Dimitrov S., Todorov T., Stoyanova Y., Nikolov G.T. // *Sensors* – 2022. – No. 22 (949). DOI: <https://doi.org/10.3390/s22030949>
5. Knot Locating in Piecewise Linear Approximation / Carlos Ugaz, Lanshan Hany, Alvin Lim. // Reprint: [arXiv:1909.03112](https://arxiv.org/abs/1909.03112) [math.OC] – 2019. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.03112>
6. Spline Regression with Automatic Knot Selection / Vivien Goepp, Olivier Bouaziz, Grégory Nuel. // *HAL journal* – 2018. – (01853459)
7. Estimation of knots location and number in the splines regression models using an optimization approach./ Alberto Rodrigues Ferreira // Dissertation, Institute of mathematics and statistics, University of Sao Paulo. – 2022.
8. Microcontrollers: A Comprehensive Overview and Comparative Analysis of Diverse Types / Muhammad Samiullah, Muhammad Zohaib Irfan, Abid Rafique.. // Muhammad Samiullah, Independent publishing - 2023. DOI: <https://doi.org/10.31224/3228>
9. Evolution, Challenges, and Optimization in Computer Architecture: The Role of Reconfigurable Systems. / Jefferson Ederhion, Festus Zindozin, Hillary Owusu, Chukwumazu Ozoomezim, Mmeri Okere, Opeyemi Owolabi, Olalekan Fagbo, Oyetubo Oluwatosin. // Reprint: [arXiv:2412.19234](https://arxiv.org/abs/2412.19234) [cs.AR], 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19234>
10. Real-time C++. / Kormanyos, C. // Springer, Berlin, Heidelberg – 2021. – P. 329–351. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-62996-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62996-3_13)
11. Microcontroller implementation of lookup table-based control functions with special emphasis on sequential control according to IEC 61131-3. / Krisztian Lamar, Peter Zalotay. // *International Journal of Electrical Engineering Education* – 2015. – 52(2). DOI: [10.1177/0020720915571492](https://doi.org/10.1177/0020720915571492)
12. Programming Language Pragmatics. / Michael Scott, Jonathan Aldrich // Morgan Kaufmann – 2025. – 5<sup>th</sup> edition.