

## ПРОГРАМНА АПРОКСИМАЦІЯ ТЕРМОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІОДНОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ В ОС ANDROID

© Коман Б. П., 2016

Запропонована методика градування діодних сенсорів температури, яка ґрунтується на комбінації двох узагальнених методів: сплайн-інтерполяції та апроксимації з використанням ортогональних поліномів Чебишова. Розроблена програма її реалізації в ОС Android. Встановлено вимоги до градування з отриманням в кінцевому результаті термометричної кривої з максимально можливою точністю. Це дає змогу автоматизувати процес отримання інтерполяційної таблиці та оптимізувати процедуру градування. Запропонована методика апробована для апроксимації характеристики термодіодного сенсора типу DT-471 фірми Lake Shore.

**Ключові слова:** апроксимація, термометричні характеристики, інтерполяція, поліноми Чебишова, сенсор, сплайн.

The method of calibrating diode temperature sensors, based on a combination of two generalized methods: spline interpolation and approximation using orthogonal Chebyshev polynomials. The program of implementation of the OS Android. The established requirements for calibration carried out to obtain the final result thermometric curve as accurately as possible. It automates the process of obtaining the interpolation table and optimize calibration procedure. The method for approximating the characteristics tested thermodiode sensor type DT-471 company Lake Shore.

**Key words:** approximation, thermometric characteristics, interpolation, polynomials Chebyshev, sensor, splines.

### Вступ

У сучасній напівпровідниковій термометрії одним із найточніших і наймасовіших сенсорів, призначених для вимірювання температури в інтервалі від 4,2 К до 500 К, є кремнієві діодні сенсори температури (ДСТ) [1]. Серед набору важливих експлуатаційних параметрів точність вимірювання – це ключовий фактор, який визначає доцільність використання вимірювального перетворювача і повинен визначатись ще на етапі його градування. Сутністю процесу градування є отримання термометричної характеристики (ТМХ) – залежності спаду напруги ( $U$ ) на сенсорі від температури ( $T$ ):  $U = f(T)$ . Прямим методом градування є проведення вимірювань у необхідних температурних точках і отримання ТМХ у вигляді масиву експериментальних даних (таблиці)  $\{U_i, T_i\}, i=1, \dots, N$ , де  $N$  – кількість вимірюваних точок ТМХ. Для забезпечення такої дискретності представлення ТМХ в робочому інтервалі ДСТ 4,2 ... 500 К необхідна величезна кількість експериментальних вимірювань. Проведення такого експерименту в цьому інтервалі температур потребує невиправдано великих матеріальних затрат. Тому доцільно застосувати певні методи отримання аналітичного представлення ТМХ, що дають змогу розрахувати значення напруги в температурних точках, які відмінні від вимірюваних. Отже, вимогою для такої обробки експериментальних даних є максимальна точність описуваної ТМХ за мінімальної кількості вимірюваних точок. Однак широкий робочий діапазон вимірів, а також ділянки з різкими змінами властивостей залежності  $f$  в ДСТ призводять до неможливості забезпечення заданої точності за допомогою відомих методик аналізу експериментальних даних.

**Метою роботи** є розроблення методики градування діодних сенсорів температури на основі комбінації двох узагальнених методів: сплайн-інтерполяції та апроксимації з використанням ортогональних поліномів Чебишова та реалізації в ОС Android, що дасть змогу використовувати її в «розумних» кишенькових пристроях типу смартфонів і планшетів.

## 1. Сучасний стан методів обробки термометричних характеристик діодних сенсорів

Розглянемо сучасні методи обробки вимірюваних даних, які використовуються для градування діодних температурних сенсорів. Як правило, використовують фізичний і математичний підходи до розрахунку термометричних характеристик. Коротко зупинимося на сучасній ситуації в математичних підходах.

Математичні методи в загальному випадку полягають у підборі параметрів простих і добре вивчених функцій, найчастіше це степеневі поліноми, для опису отриманих експериментальних даних. Крім мінімальної похибки підгонки залежності  $f$ , додатковими вимогами до таких функцій є неперервність і гладкість самої кривої та її похідних. Функції для опису експериментальної кривої можна підібрати для кожного інтервалу між експериментальними точками (метод сплайнів) або для всієї залежності загалом.

Для інтерполяції ТМХ найширше застосовують метод сплайнів, що полягає у знаходженні функції для кожного інтервалу поміж сусідніми експериментальними точками, відповідно до умови рівності похідних у точках зшивання. Серед переваг цього методу варто відзначити високу точність і локалізацію похибок обробки, у випадку наявності поодиноких промахів у експериментальних даних. Легкість реалізації і гнучкість самого підходу є причинами зростання його популярності. Створено багато типів сплайн-функцій, кожен з яких зручний для опису тієї чи іншої залежності [2]. Однак для ТМХ ДСТ таких функцій поки що не розроблено. Для оцінки залежності  $f(T)$  зазвичай користуються поліноміальними сплайнами третього (інколи п'ятого) степеня. Використовують також ермітівські сплайни, однак їх застосування потребує даних про значення похідних описуваної функції, а ці дані не завжди доступні.

Поряд із цими перевагами, для методу сплайнів характерні недоліки суто інтерполяційного підходу – висока чутливість до випадкових огріхів вимірювання. Окрім того, описування неперервних дійсних характеристик множиною різних функцій є причиною великих похибок під час визначення перших похідних, що є джерелом додаткових похибок у табличному представленні кривої шуканої функції  $f$ . Як показує досвід застосування кубічного сплайну для інтерполяції термометричних характеристик ДСТ, за похибок вимірювання напруги 10 мкВ похибка інтерполяції може досягати 4 мВ, а в випадку нерівномірного кроку зняття термометричних характеристик – 10 мВ.

У зв'язку з широким діапазоном вимірювання і різкою зміною виду функції перетворення ДСТ в області низьких температур ( $4,2 \text{ K} < T < 20 \text{ K}$ ), а також похибок і можливих помилок під час вимірювань, застосовуванішим є апроксимаційний підхід. ТМХ подають у вигляді функції, яку розраховують на підставі мінімуму суми квадратів відхилень від експериментальних даних [3–5]. Як функції наближення найвигідніше використовувати степеневі поліноми степеня  $n \leq N$ , де  $N$  – кількість вимірюваних точок діапазону. Зі збільшенням степеня полінома похибка апроксимації зменшується. Однак, як показано в [6], оцінка  $\tilde{f}$  зводиться до шуканої залежності  $f$  не для всіх типів функцій. У разі апроксимації термометричних характеристик ДСТ, знятих з рівномірним кроком, поліномами високого степеня спостерігаються пульсації – різке збільшення похибки апроксимації у точках, відмінних від вимірюваних ( $T \neq T_i$ ). На практиці рідко використовують степінь полінома  $n$ , більший від шостого, що не дає змоги апроксимувати ТМХ термодіодних сенсорів, які характеризуються великим робочим діапазоном і сильною нелінійністю в області низьких температур. Це призводить до необхідності розподілу  $f$  на діапазони з подальшим їх зшиванням, що є достатньо трудомістким процесом. Використання поліномів Чебишова, які дозволяють уникнути пульсацій, потребує значної кількості вимірів у строго визначених температурних точках.

Крім того, оцінку значень ТМХ можна отримати за допомогою сплайн-інтерполяції, а вже потім застосовувати наближення поліномами Чебишова. Логічно припустити, що такий підхід дасть змогу поєднати кращі особливості цих способів обробки. У цьому аспекті основним завданням у вирішенні поставленої проблеми було розроблення алгоритму, який реалізує вказаний метод, та встановлення умов найбільшої його ефективності.

## 2. Методика обробки експериментальних даних

### 2.1. Опис процедури обробки даних

Вхідними даними для запропонованого вище методу є таблиці експериментальних даних температурної характеристики термодіодних сенсорів типу DT-470, DT-670, TG-120 фірми Lake Shore, поданої на сайті [7] (Curve 10). Температурна характеристика цього сенсора задана 120 значеннями у діапазоні від 4.2 К до 475 К. Методика обробки складається з двох етапів.

1. Визначення значень ТМХ у температурних точках, що відповідають вузлам поліномів Чебишова. Назвемо цю процедуру інтерполяцією.

2. Апроксимація ТМХ з допомогою ортогональних поліномів.

Розглянемо проблеми реалізації вказаних етапів обробки детальніше.

#### Апроксимація ТМХ

Загальний підхід до апроксимації експериментальних даних полягає у поданні шуканої залежності  $f$  у вигляді лінійної комбінації функцій  $\varphi_j(X)$ :

$$\tilde{f}_N(X) \approx \sum_{j=1}^n a_j \varphi_j(X), \quad (1)$$

де  $\tilde{f}_N(X)$  – оцінка  $f$ ;  $a_j$  – коефіцієнти;  $n$  – степінь полінома наближення;  $X$  – вектор-аргумент функцій  $\varphi_j$ , наприклад, температура  $T = \{T_i\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ .

Коефіцієнти  $a_j$  визначаємо на основі мінімумів суми квадратів відхилень оцінки функцій від експериментальних даних:

$$\Theta = \sum_{i=1}^N \{f_i - [a_0 \varphi_0(T_i) + a_1 \varphi_1(T_i) + \dots + a_n \varphi_n(T_i)]\}^2. \quad (2)$$

Розрахувавши похідні функцій  $\Theta$  і прирівнявши їх до нуля, отримаємо систему нормованих рівнянь. Якщо виконуються умови ортогональності:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \varphi_k(x_i) \varphi_l(x_i) = 0, \text{ при } k \neq l; \\ \sum_{i=1}^N (\varphi_l(x_i))^2 \neq 0, \text{ при } l = 1 \dots n. \end{cases} \quad (3)$$

ця система істотно спрощується, а  $a_j$  визначаємо з виразу

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \varphi_j(T_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi_j^2(T_i)}. \quad (4)$$

У разі використання ортогональних поліномів Чебишова  $\varphi_j(X)$  із виразу (1) подаємо у вигляді:

$$\varphi_j(X) = \begin{cases} \varphi_1(X) = 1; \\ \varphi_2(X) = X; \\ \varphi_j(X) = 2X\varphi_{j-1}(X) - \varphi_{j-2}(X). \end{cases} \quad (5)$$

Також можливий запис  $\varphi_j(X) = \cos(N \arccos(X))$ . Для функцій такого типу умови ортогональності виконуються, якщо елементи вектора  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$  належать інтервалу  $[-1, 1]$  і визначаються з відношення

$$x_i = \frac{\cos((2i+1)\pi)}{2N}. \quad (6)$$

Отримати значення аргументу на всьому інтервалі вимірювання ДСТ можна за допомогою нормування (заміни) значень температури такого вигляду:

$$T_i = \frac{(T_{\max} - T_{\min})x_i}{2} + \frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2}, \quad (7)$$

де  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  – межі інтервалу температури.

Виберемо критерії для визначення кількості генерованих точок  $N$ . Похибка апроксимації залежить як від степеня наближення полінома  $n$ , так і від кількості вузлів, на яких його розраховують. У разі виконання умови  $N > 2n$  похибка апроксимації перестає залежати від  $P$  – кількості генерованих точок, і подальше його збільшення не має сенсу.

Наближені значення таблично заданої функції знаходили з використанням методики кубічної сплайн-інтерполяції [8].

## 2.2. Неперервна апроксимація температурної характеристики термодіодного сенсора та його чутливості

Розглянемо апроксимацію температурної характеристики термодіодного сенсора типу DT-670 фірми Lake Shore, поданої на сайті [7] (Curve 10). Температурна характеристика цього сенсора задана 120 значеннями у діапазоні від 1.4 К до 475 К. Графік цієї температурної характеристики зображено на рис. 1, а графік чутливості сенсора – на рис. 2.

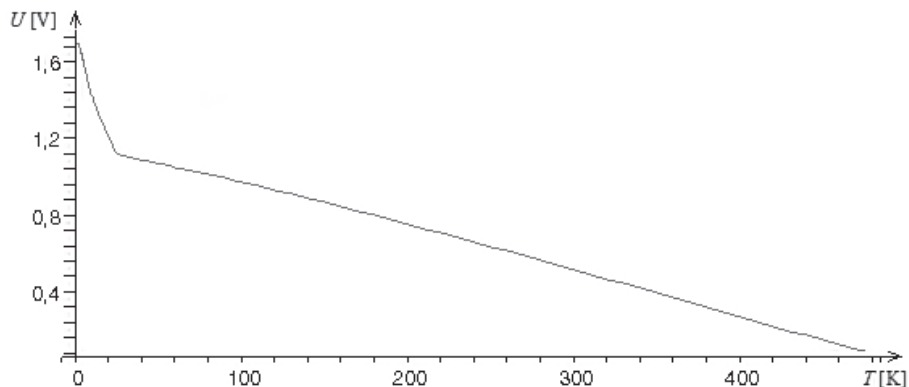


Рис. 1. Графік температурної характеристики сенсора DT-471

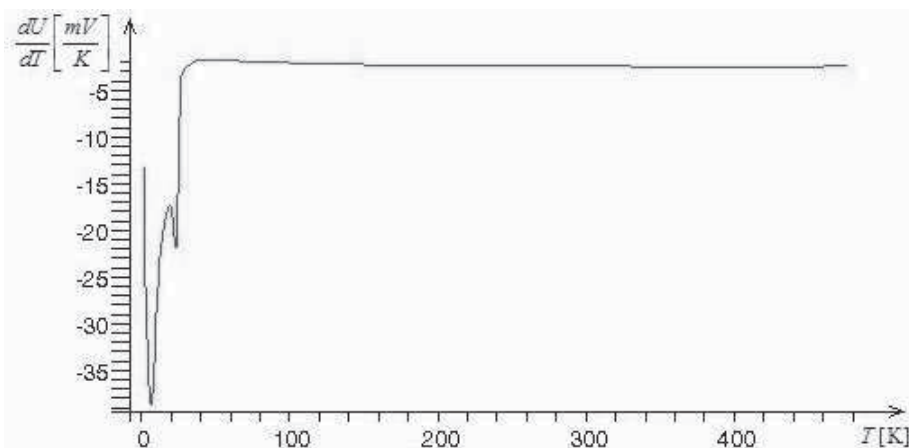


Рис. 2. Графік чутливості сенсора типу DT-471

Для опису цієї температурної характеристики отримано неперервний і гладкий балансний сплайн, відносна похибка якого не перевищує 0,03 %. Цей сплайн складається із шести ланок, визначених за чебишовським критерієм, кожна з яких задана поліномом п'ятого степеня

$$U_j(T) = \sum_{i=0}^5 a_i^{(j)} T^i, \quad (8)$$

де  $j$  – номер ланки. Значення коефіцієнтів поліномів (1) для кожної з ланок цього сплайна, а також межі ланок наведено в таблиці.

Номер ланки	Межі ланки	Значення коефіцієнтів полінома (16) у послідовності зростання степеня	Похибка апроксимації, %	
			характеристики	чутливості
1	1,4; 12	$1,7103271; -1,9989467 \cdot 10^{-3}; 4,8893344 \cdot 10^{-3}; 1,9990021 \cdot 10^{-5}; 3,4349482 \cdot 10^{-5}; -1,4507749 \cdot 10^{-6}$	0,25	16,2
2	12; 22	$2,4487157; -0,25724672; 2,73776 \cdot 10^{-2}; -1,6298457 \cdot 10^{-3}; 4,9900542 \cdot 10^{-5}; -6,2051397 \cdot 10^{-7}$	0,008	0,73
3	22; 26	$81,153238; -19,959439; 1,9429376; -9,2568187 \cdot 10^{-2}; 2,1651085 \cdot 10^{-3}; -1,9942037 \cdot 10^{-5}$	0,022	2,57
4	26; 46	$3,5701596; -0,32433755; 1,7194142 \cdot 10^{-2}; -4,559726 \cdot 10^{-4}; 6,0103265 \cdot 10^{-6}; -3,1483237 \cdot 10^{-8}$	0,026	7,1
5	46; 390	$1,1489153; -1,3559077 \cdot 10^{-3}; -4,7383389 \cdot 10^{-6}; 1,0344912 \cdot 10^{-8}; -9,9551343 \cdot 10^{-12}; 1,8461086 \cdot 10^{-15}$	0,025	0,63
6	390; 475	$-34,071441; 0,42745457; -2,0940457 \cdot 10^{-3}; 5,1036573 \cdot 10^{-6}; -6,2237301 \cdot 10^{-9}; 3,037588 \cdot 10^{-12}$	0,004	0,23

Відносна похибка відтворення сплайном значення чутливості 16,2 % на першій ланці зумовлена похибкою відтворення чутливості за температури 1,4 К, за температури 1,6 К вона становить 6,77 %, а в решті точок спостереження на цій ланці відносна похибка відтворення чутливості сенсора не перевищує 4 %. Висока похибка 7,1 % відтворення сплайном чутливості сенсора на четвертій ланці пояснюється наявним на цьому інтервалі локальним мінімумом функції, що описує чутливість сенсора (рис. 4). Правда, якісний характер зміни чутливості сенсора в діапазоні перших чотирьох ланок, тобто для температури від 1,4 К до 46 К, похідна від сплайну відтворює задовільно. Візуальним підтвердженням цьому може бути рис. 3, на якому зображено графік розрахованих за сплайном значень чутливості сенсора у цьому діапазоні й відповідні спостережувані значення чутливості. Точками на цьому рисунку відображено результати спостереження, а крива зображає значення похідної від сплайна. Наведені в таблиці результати неперервної апроксимації температурної характеристики і чутливості термодіодного сенсора підтверджують доцільність застосування балансного сплайн-наближення з ланками, визначеними за мінімальним критерієм. Отриманий сплайн відтворює температурну характеристику термодіодного сенсора в діапазоні температур від 1,4 К до 475 К з відносною похибкою, меншою за 0,026 %. Особливо ефективно виглядає порівняння кількості параметрів цього сплайна з апроксимацією поліномами Чебишова високого степеня, запропонованою у роботі [9]. Загальна кількість параметрів апроксимації у цьому разі значно менша, оскільки чебишовський критерій забезпечує досягнення найменшої похибки наближення для заданої кількості параметрів.

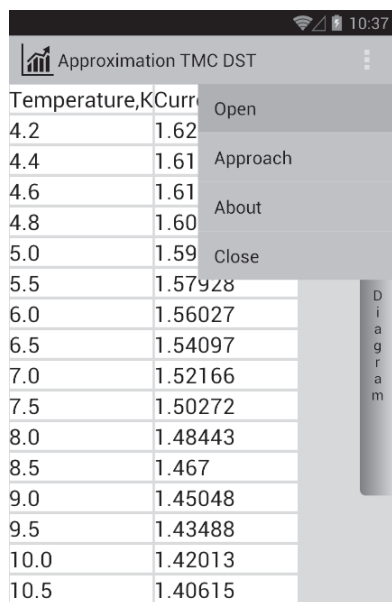
### 3. Практична частина

У процесі виконання роботи реалізована програма математичної обробки термометричних характеристик діодного сенсора температури, зокрема здійснена комбінація двох узагальнених методів: сплайн-інтерполяції та апроксимації з використанням ортогональних поліномів Чебишова. Метою такої обробки експериментальних даних є досягнення максимальної точності описуваної

ТМХ за мінімальної кількості вимірюваних точок. Програма реалізована в середовищі Android Studio 1.2.2, мовою Java, для ОС Android. Програма підтримує версію Android 4.0 і вище.

Метою програми є проведення математичних розрахунків і їх візуалізація для оптимізації процедури градування діодних сенсорів температури.

Вхідними даними для обробки є файл у форматі \*.txt, який повинен містити таблицю із заданими температурою ( $T$ , К) та відповідну їй напругу виходу ( $U$ , мВ) діодного сенсора температури за сталої величини струму 1 мкА. Також у головному вікні є значок меню з такими пунктами: відкриття нового файлу, розрахунок похибки апроксимації, загальні відомості про додаток і функція завершення роботи аплікації (рис. 3).



Temperature, K	Current, mA
4.2	1.62
4.4	1.61
4.6	1.61
4.8	1.60
5.0	1.59
5.5	1.57928
6.0	1.56027
6.5	1.54097
7.0	1.52166
7.5	1.50272
8.0	1.48443
8.5	1.467
9.0	1.45048
9.5	1.43488
10.0	1.42013
10.5	1.40615

Рис. 3. Головне вікно програми та вигляд меню додатка

Після натискання кнопки “Diagram” (рис. 3) здійснюється інтерполяція (клас Spline.java) і апроксимація (клас Chebyshev.java) вхідних даних, і лише після цього відбувається візуалізація у вигляді графіка (рис. 4).

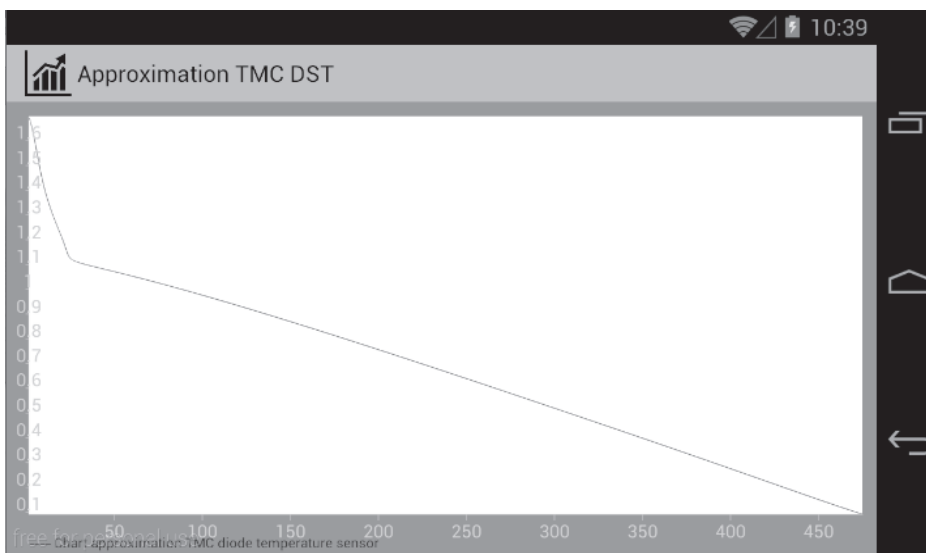


Рис. 4. Графік апроксимованої функції

У меню є пункт “Approach”, який показує похибку апроксимації (рис. 5) на різних ланках термометричних характеристик діодних сенсорів температури.



Approximation TMC DST	
Limits units	Approach,%
1,4-12	0,025
12-22	0,008
22-26	0,022
26-46	0,026
46-390	0,025
390-475	0,004

Рис. 5. Похибка апроксимації

Похибку апроксимації обчислювали за формулою:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{U}_i - U_i)^2}{(N - n - 1)}}$$

де  $\tilde{U}_i$  – оцінка термометричної характеристики для температури;  $U_i$  – результат інтерполяції;  $n$  – степінь апроксимуючого полінома;  $N$  – кількість генерованих точок.

Дані, наведені на екранах, – це результати тестування роботи програми з термометричними характеристиками діодного сенсора температури Lake Shore DT-471, отримані з офіційного сайта [7].

### Висновки

У роботі описано методи математичної обробки реальних термометричних характеристик діодних сенсорів температури та програмне середовище, у якому виконана робота.

Досліджено особливості знаходження алгебраїчних многочленів найоптимальнішого квадратичного наближення за методом найменших квадратів.

Розроблено програму для апроксимації реальних ТМХ діодних сенсорів температури. Програму написано мовою Java у середовищі розроблення Android Studio. Створено зручний користувацький інтерфейс.

Здійснено апробацію результатів роботи програми за допомогою аналізу ТМХ ДСТ Lake Shore DT-471.

1. Температурные измерения / О. А. Геращенко, А. И. Гордов, А. К. Еремина и др. – К.: Наук. думка, 1989. – 704 с.
2. Шварц Ю. М., Яганов П. А., Дзюба В. Г. Нейросетевая аппроксимация термометрической характеристики диодного сенсора // *Технология и конструирование в электрон. аппаратуре.* – 2005. – № 5. – С. 18–22.
3. Пізюр Я. В., Попов Б. О. Побудова многочленних ермітово-чебишовських сплайнів третього степеня // *Волинський математичний вісник.* – 1995. – Вип. 2. – С. 129–131.
4. Диалоговый пакет программ для аналитической обработки табличных данных (ППП РАДАН – 2) / Б. Р. Монцибович, Г. Ф. Криворучко, П. С. Малачивский и др. – Львів, 1988. – 135 с.
5. Малачівський П., Андруник В. Рівномірне сплайн-наближення // *Комп'ютерні технології друкарства.* – Львів: Українська академія друкарства, 2002. – № 7. – С. 107–115.
6. Малачівський П. С. Рівномірне наближення з точним відтворенням значень функції та похідної в заданих точках // *Доп.НАН України.* – 2006. – № 9. – С. 80–85.
7. <http://www.lakeshore.com>.
8. Денисюк В. П., Марченко Б. Г. Сплайны и их приложения в задачах моделирования и обработки измерительных сигналов. – К.: Национальный технический университет Украины "КПИ", 1995. – 246 с.
9. Иващенко А. Н., Шварц Ю. М. Аппроксимация термометрических характеристик кремниевых диодных сенсоров температуры // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника: межвед. сб. науч. тр.* – 2003. – Вып. 38. – С. 61–70.