

ПОВНА ЛІНІЙНА ШКАЛА ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІНФОРМАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ДВОХ ДОПОМІЖНИХ ШКАЛ З РІЗНИМИ ОДИНИЦЯМИ КВАНТУВАННЯ

Розглянуто методи утворення лінійної вимірювальної шкали, побудованої з різними кількісними та якісними характеристиками допоміжних шкал. Проведено їх порівняння для визначення кращих показників, які описують якість лінійки. Описано метод утворення повної лінійної шкали з двох допоміжних шкал. В ході роботи вдалось знайти спосіб значно покращити характеристики лінійки з найвищим рівнем квантування. Сформульовано правила, за якими будується удосконалений метод, та розроблена для нього блок-схема, яка відображає швидкий алгоритм послідовної побудови основної лінійної шкали. Формалізовано процес побудови шкали очікуваного вимірювального перетворювача.

Ключові слова: вимірювальна шкала, лінійка, лінеаризація, квантування, основна шкала, допоміжні шкали, поділки шкали.

V.A. VARESHKO

Khmelnytskyi National University, Ukraine

COMPLETE LINEAR SCALE FOR INFORMATION MEASURING CONVERTER BY USING TWO SUPPLEMENTARY SCALES WITH DIFFERENT QUANTIZATION UNITS

Abstract – There have been considered methods of creation of linear measuring scale, developed with different quantitative and qualitative characteristics of auxiliary scales. The scales have been compared to determine better factors which describe the quality of the ruler. Method for creating a full linear scale of two auxiliary ones has been described. In the course of work, it has been succeeded in the way to improve remarkably the ruler characteristics with the highest level of quantization. There have been formulated principles according to which the improved method is developed, and the block diagram has been designed for it, displaying a fast algorithm for constructing successively the basic linear scale. Process of constructing the scale in the expected measuring converter has been formalized.

Keywords: measuring scale, ruler, linearization, quantization, the main scale, auxiliary scale, scale points.

Вступ

Процес вимірювання будь-якого об'єкта зводиться до визначення числового значення вимірюваної величини. Цей процес проводиться шляхом порівняння її з еталонним зразком за допомогою засобів вимірювальної техніки. Фізичні величини об'єктів вимірюються технічними засобами (приладами для вимірювання) різної конструкції, конкретно підбраної з вимірювання. Таким чином, в кожному приладі потрібно помістити шкалу вимірювання, яка відповідатиме певним критеріям вимірювання.

Основна характерність лінійної шкали полягає у тому, що одиниця квантування між двома відмітками однакова по всій шкалі. Проте, коли потрібно вимірювати об'єкти великого розміру з високою точністю, виникають певні ускладнення. Якщо розглядати електронні вимірювальні прилади, то для розміщення лінійної високоточної шкали потрібні місце, матеріал і енергозатрати. Оскільки є ряд електронних приладів, які працюють не лише зі статичними, але й динамічними даними, які дуже швидко змінюються в часі, виникає потреба й у неабиякій швидкодії таких приладів. Зрозуміло, що чим точніші вимірювання, тим вони більш затратні по часовій шкалі. Ця шкала називається шкалою дискретизації або дискретизація в часі. Для динамічних об'єктів дуже важливо, щоб виконувалась теорема відліків Найквіста: для того, щоб відновити сигнал на прийомі без втрат, необхідно, щоб частота дискретизації була хоча б у два рази більша за максимальну частоту вихідного сигналу [1]. Це, в свою чергу, означає, що у високоточних вимірюваннях високочастотних вхідних даних важливу роль відіграє не лише точність вимірювальної шкали, а й швидкість проведення самого вимірювання, так звана дискретизація в часі.

Аналіз першоджерел

Існують такі структурні схеми аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) [1]:

- паралельні;
- послідовно-паралельні: багатоступінчасті, багатотактні послідовно-паралельні, конвеєрні АЦП;
- послідовні АЦП: послідовного рахунку, послідовного наближення.

Розглянувши їх, можна зробити висновок, що відомо багато методів перетворення напруга – код. Ці методи суттєво відрізняються один від одного потенційною точністю, швидкістю перетворення і складністю апаратної реалізації. Кожен з методів використовує цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), які слугують еталонами для визначення відповідного коду вхідної напруги. Тому для створення високоточних швидкодіючих АЦП потрібно вдосконалювати шкалу еталонних значень, якою слугують саме ЦАПи.

Оскільки найшвидшими властивостями серед перетворювачів володіють паралельні АЦП, тому більшість АЦП мають у своїй схемі саме їх основу, проте послідовні відзначаються своєю простотою побудови, обумовленою послідовним виконанням процесу перетворення. Тому потрібно komponувати очевидні переваги різних типів перетворювачів для вдосконалення цього процесу.

Проаналізувавши різні методи вимірювання лінійних величин, можна відзначити метод ноніуса [2].

Взявши за основу те, що у ноніусі використовується дві лінійки з різними одиницями квантування, доцільно було би випробувати це у вимірювальних технологіях перетворювачів. Такі переваги будуть очевидними, оскільки за наявності меншої кількості порівняльних елементів перетворювача на основі паралельного АЦП можливо підвищити не тільки точність вимірювань, а й розміри вимірювальних величин. Таку ідею запропонував І. В. Троцишин у своїй роботі [3], де описується метод використання двох багатозначних нерегульованих мір з неоднаковими розмірами квантів. У роботі [4] розглянуто можливості застосування квантової теорії вимірювального перетворення амплітудних параметрів (ЦАП-АЦП) із використанням методу коінциденції.

Використовуючи шкали, побудовані на різниці значень допоміжних шкал, можна збільшити повну шкалу вимірювального перетворення, яка може перевищувати за кількістю поділок класичну у десятки, а то й у сотні разів [4].

Мета

Метою даної роботи є визначення методу вимірювання з подальшим його доопрацюванням, при якому зменшаться матеріальні затрати і збільшиться роздільна здатність вимірювального приладу. Також не обтяжуватиметься функціональною складністю вимірювального процесу і теоретично зменшило б час дискретизації порівняно з методами, які видають подібну роздільну здатність.

Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети потрібно порівняти лінійки, утворені за допомогою двох допоміжних шкал, з різними якісними та кількісними характеристиками. Крім того, слід розглянути набір одержаних шкал за вдосконаленою методикою. Необхідно визначити оптимальну шкалу для вимірювального пристрою за такими критеріями: мінімізація часу для визначення (побудови, одержання) лінійки, утвореної з двох наборів шкал, максимізація кількості поділок шкали і зменшення одиниці квантування. Далі провести описову характеристику отриманої шкали. З рештою, необхідно визначити алгоритм побудови оптимальної шкали у вигляді блок-схеми.

Розв'язання задачі

Раніше, у працях [5, 6, 7], розглядався такий варіант, де дві шкали з m й n ($m = n \pm 1$) позначками ставились у відповідність для формування основної шкали. Тобто значення, які набувають m позначок однієї лінійної шкали, по чергово віднімали від значень, які набували n позначок іншої лінійної шкали. Таким чином одержували $m \cdot n$ нових значень. Проте велика кількість цих значень мала повторення за рахунок того, що береться абсолютна величина від їх різниці. Таким чином, нова шкала містила не $m \cdot n$ значень, як би того хотілось, а

$$N' = m \cdot n - n_{\text{repeat}}, \quad (1)$$

де n_{repeat} є кількістю повторень, яка визначається за формулою

$$n_{\text{repeat}} = \frac{(m-1)(n-1)}{2}. \quad (2)$$

Для створення такої шкали не брались до уваги початкові значення допоміжних шкал, тобто нуль. Це обумовлювалось тим, що при створенні основної шкали з'являвся нуль, коли віднімалися два максимальних значення допоміжних шкал, а вони за умовою однакові (рівні одиниці). Але в такому випадку основна шкала не мала максимальної довжини шкали і права границя визначалась як $1 - \frac{1}{\max\{m, n\}}$. Тому,

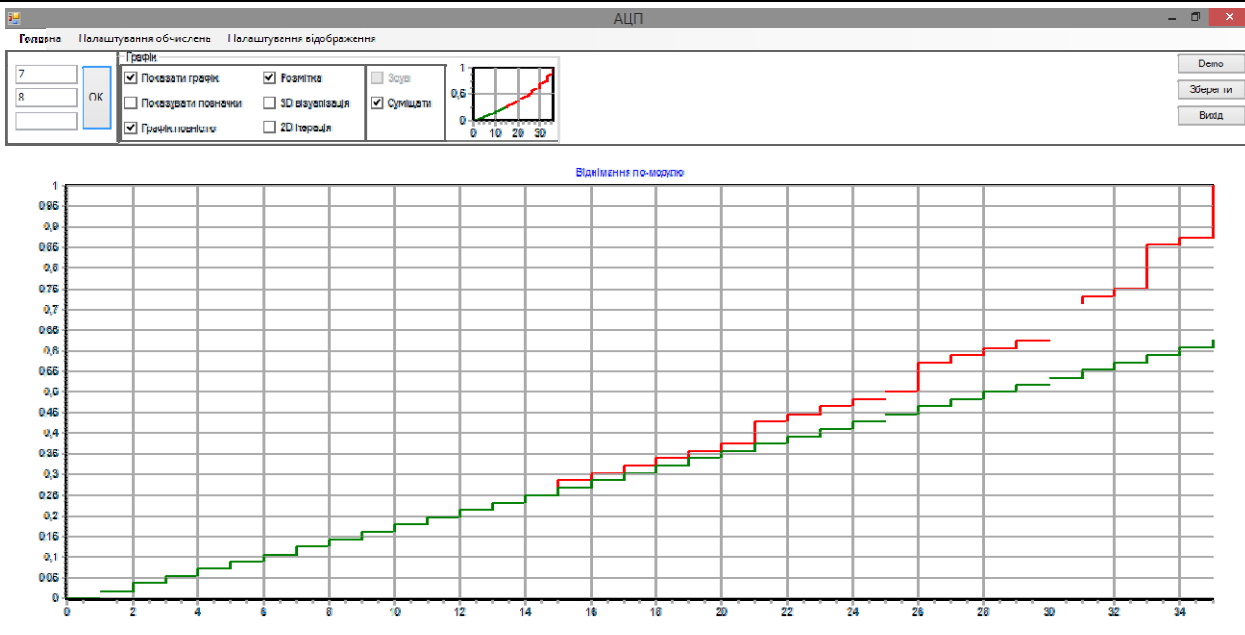
ввівши в допоміжні шкали значення нуль, права границя основної шкали набуватиме максимальної довжини 1, кількість поділок допоміжної шкали m буде рівна $m+1$, а шкали n – буде рівна $n+1$. Зміниться також кількість нових значень з $m \cdot n$ на $(m+1) \cdot (n+1)$. Нова шкала міститиме $N = N' + 1$ значення або

$$N = \frac{(m+1) \cdot (n+1)}{2}. \quad (3)$$

Кількість дублюючих значень також буде рівна N .

При утворенні нової шкали з'являється нелінійність за рахунок "випадання" значень або точок розриву. Тобто при визначенні абсолютної різниці елементів двох шкал не утворюються певні елементи нової шкали. Наведений приклад на рис. 1 ілюструє таку шкалу для $m \times n = 7 \times 8$.

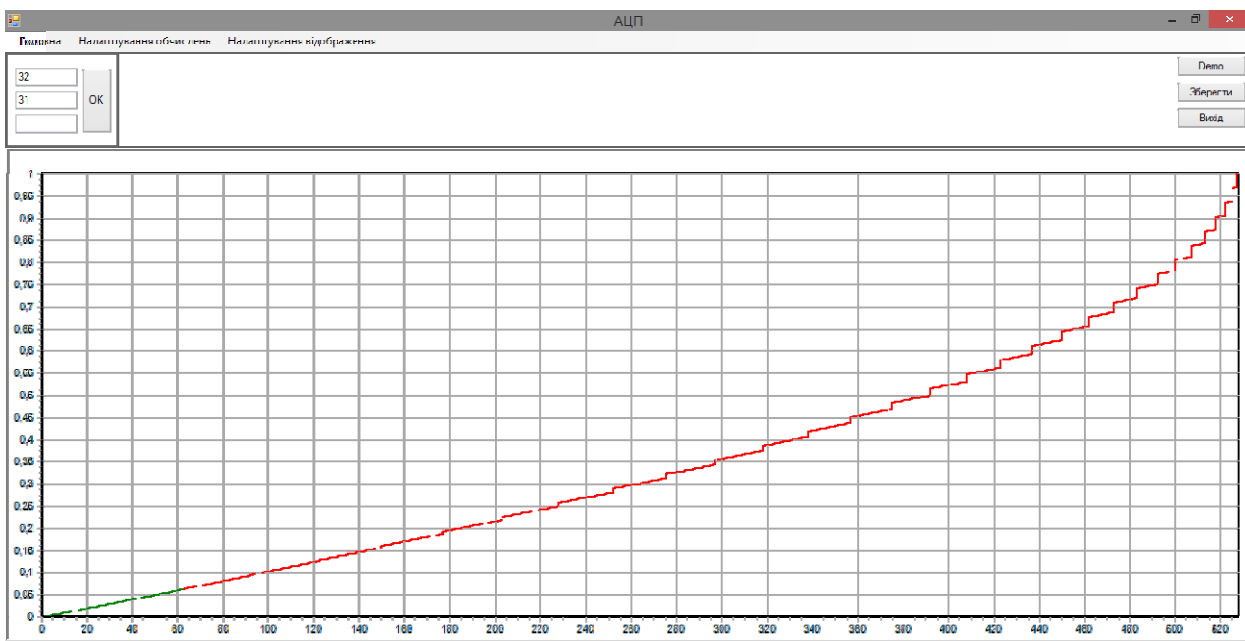
На даному графіку видно, що верхня шкала до точки 15 була лінійною. У цій точці в неї відбувся стрибок на один квант. Тобто тут "випало" одне значення квантування шкали. Таких точок є декілька. Зі збільшенням значень m та n збільшується кількість таких точок і їх стрибки. Таким чином, отримана шкала перестає бути лінійною і при вимірюваннях об'єктів, де потрібна лінійна шкала, ця шкала даватиме неточні результати для великих амплітуд на вході. Для порівняння, нижня шкала є еталонною. Особливості побудови такої шкали більш детально описано в [5].



Кількість усіх значень: 56. Ліва границя: 0 (0), права границя: 15 (0,25), кількість проміжних значень: 15. Одиниця квантування: 1/56 (0,018)

Рис. 1. Приклад нелінійності значень шкали, побудованої з двох допоміжних шкал з кількістю поділок 7 та 8

При більших значеннях m й n отримаємо результат, зображений на рис. 2.



Кількість усіх значень: 992. Ліва границя: 0 (0), права границя: 63 (0,062), кількість проміжних значень: 63. Одиниця квантування: 1/992 (0,001)

Рис. 2. Приклад нелінійності значень шкали, побудованої з двох допоміжних шкал кількістю поділок 32 та 31

Знову ж таки, на цьому графіку видно, що точки розміщені нерівномірно, стрибкоподібно, а лінійність зберігається на певних ділянках східцеподібної форми, де при переміщенні вправо по вісі абсцис спостерігається поступове ущільнення стрибків вгору і їх висота збільшується пропорційно кількості появи нових сходинок. Еталонна шкала вміщує в собі лише до $m + n$ позначок повної шкали. Проте, збільшивши різницю позначок на одній із допоміжних шкал з однієї до двох і ввівши додаткову умову, що m та n – парні, шкала дещо змінить свій вигляд. Одиниця квантування зміниться із

$$q = \frac{1}{m \cdot n} \tag{4}$$

до $\frac{2}{m \cdot n}$ (рис.3). В загальному випадку, коли m та n – парні і різниця між кількістю поділок додаткових шкал рівна $2k$, де $k = 1, 2, 3, \dots$, то одиниця квантування залежатиме від найбільшого спільного дільника (НСД) значень m й n . Нехай функція $\varphi(m, n)$ визначає НСД значень m та n , тоді квант q

визначатиметься як $q = \frac{\varphi(m, n)}{m \cdot n}$.

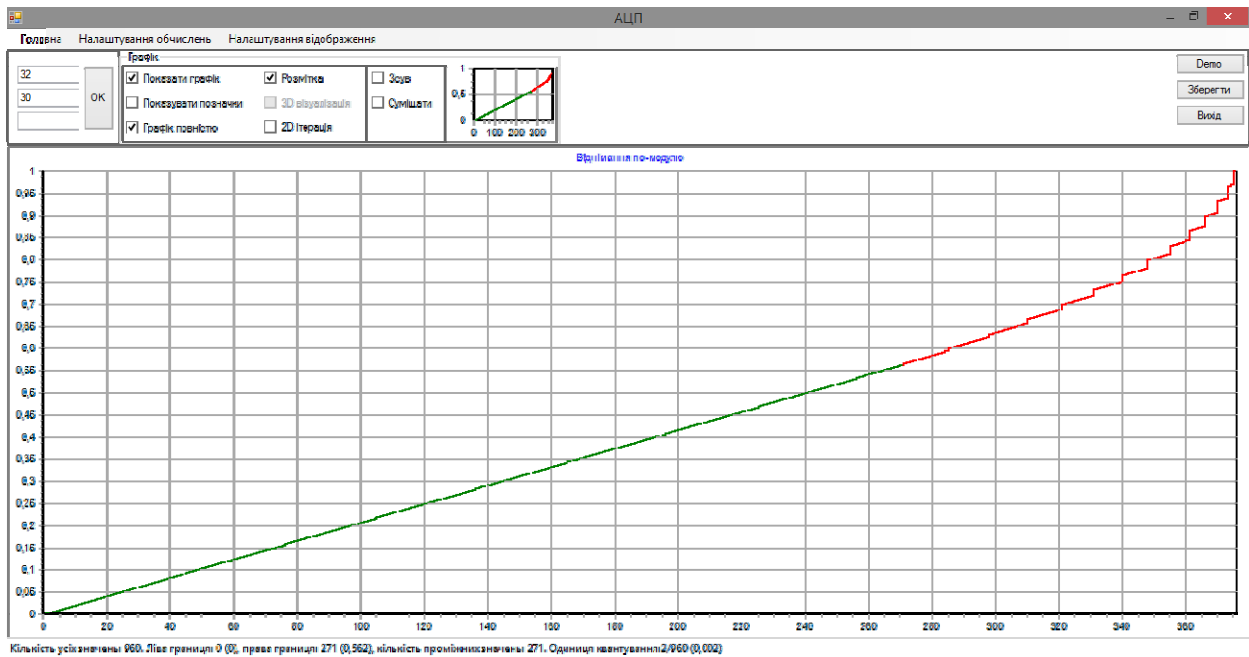


Рис. 3. Приклад для парних m та n при $|m - n| = 2$ ($m = 32, n = 30$)

Перевагою цього способу є те, що лінійність збільшується, сягаючи не менше 50 % від усієї шкали. В загальному випадку, коли різниця між кількістю поділок додаткових шкал рівна $2k$, де $k = 1, 2, 3, \dots$, то лінійність може сягати приблизно 80 % (рис. 4).

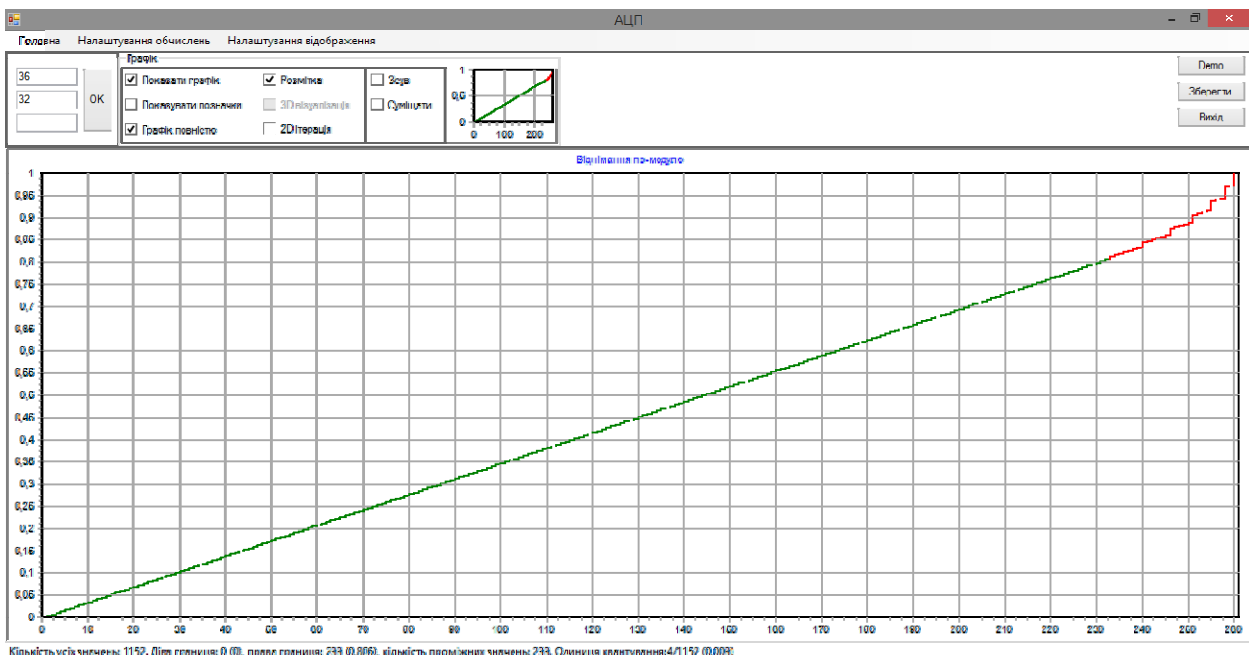


Рис. 4. Лінійність шкали, утвореної з двох допоміжних шкал по 36 і 32 позначки, сягає близько 80 %

Проте такі маніпуляції негативно впливають на одиницю квантування шкали, оскільки вона залежить від НСД m й n . Тому найкраще, коли квант буде максимально можливий і дорівнюватиме (4), а шкала буде повністю лінійною, тобто без точок розриву. Такого результату можна добитись, ввівши поправки в утворення такої лінійки. Точки, які "випали", можна визначити, скориставшись однією з допоміжних шкал ще раз. Для цього потрібно від значень отриманої шкали знову по чергово відняти значення допоміжної шкали. Щоб прискорити обчислення, логічно вибрати ту шкалу, де значень менше. Послідовність дій, які потрібно виконати, щоб отримати повністю лінійну шкалу така: спершу знайдемо абсолютну різницю між значеннями обох додаткових шкал і отримаємо $(m + 1) \times (n + 1)$ -матрицю значень d_{ij} :

$$d_{ij} = \frac{|(i-1)n - (j-1)m|}{mn}, \tag{5}$$

де $i = \overline{1, m+1}$ та $j = \overline{1, n+1}$.

Наступним кроком буде видалення з $(m+1) \times (n+1)$ -матриці N повторень і сортування по зростанню тих N елементів, які залишились. Утвориться нова шкала – вектор значень $C = [c_s]_{1 \times N}$, яка буде неповною, тобто не матиме певних значень для монотонності. Як відшукати ці місця на шкалі, описано у джерелі [6]. Далі по аналогії з (5) поелементно віднімаємо від нової шкали значення із меншої додаткової шкали:

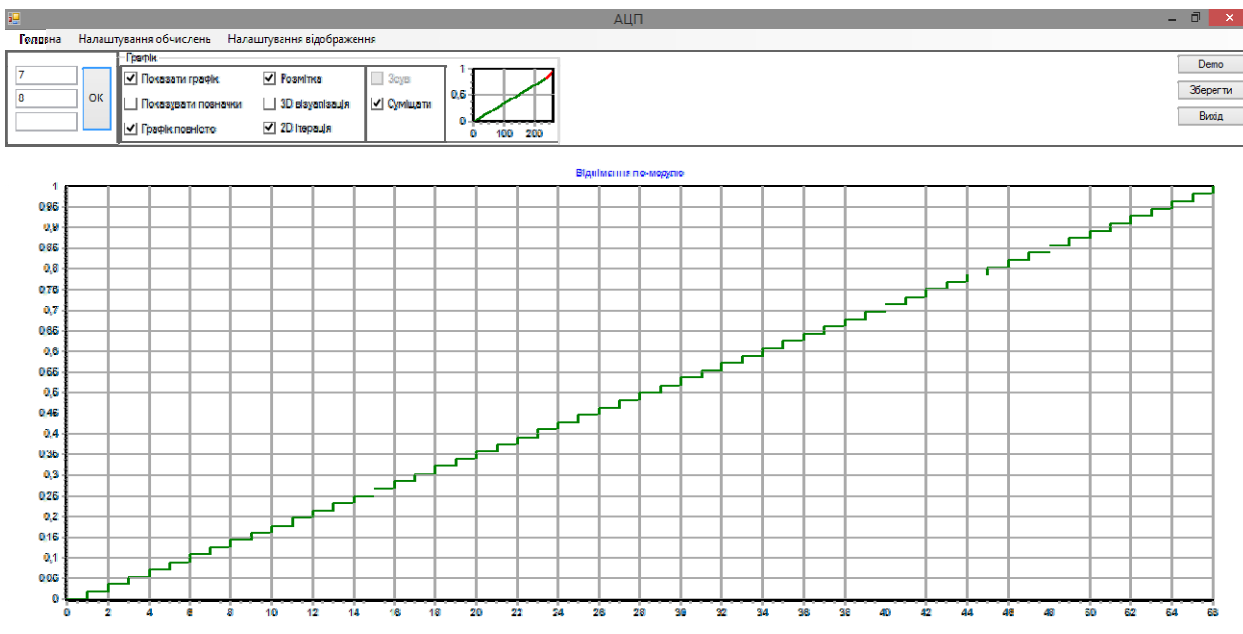
$$g_{si} = |c_s - a_i|, \tag{6}$$

де g_{si} є новим значенням $N \times (\min\{m+1, n+1\})$ -матриці, $s = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, \min\{m+1, n+1\}}$, a_i є значенням вектору меншої шкали.

Якщо із одержаних елементів $N \times (\min\{m+1, n+1\})$ -матриці видалити усі повторення і відсортувати у порядку зростання значень, утвориться монотонна лінійка по всій її довжині, ліва межа якої набуватиме значення 0, а права значення 1. Таким чином, кількість поділок N на лінійній рівномірній шкалі буде рівна

$$N = m \cdot n + 1, \tag{7}$$

а одиниця квантування по всій шкалі буде рівна (4). Результат такого пошуку значень відображено на рисунку 5.



Кількість усіх значень 1152. Ліва границя 0 (0), права границя 233 (0,206), кількість проміжних значень 233. Одиниця квантування 1/1152 (0,0009)

Рис. 5. Лінійна рівномірна шкала 7×8 , з одиницею квантування $1/56 \approx 0,017857$ і кількістю поділок $N = 57$

Проте, щоби побудувати таку шкалу, потрібно затрачувати багато часу для побудови спочатку однієї шкали, перебравши $(m+1) \cdot (n+1)$ значень $(m+1) \times (n+1)$ -матриці, а потім –

$$N \cdot \min\{m+1, n+1\}$$

значень $N \times (\min\{m+1, n+1\})$ -матриці, причому

$$N \cdot \min\{m+1, n+1\} > (m+1) \cdot (n+1).$$

Тому для зменшення часу пошуку можна використати певні закономірності розташувань елементів d_{ij} та g_{si} у матрицях, побудованих за формулами (5) і (6) відповідно, у випадках, коли $m = n \pm 1$. Такі матриці дають максимальну розрядність шкали і тому економічно вигідні [7, с. 95]. Із цих причин тут і надалі розглядатимуться варіанти, коли $m = n \pm 1$.

Утворивши матрицю $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ з елементами (5), можна помітити таку закономірність: значення d_{ij} при $i \geq j$ ($i = \overline{1, m+1}$ та $j = \overline{1, n+1}$) і значення $i < j$ – повторюються у зворотному порядку для $m < n$. А при $i \leq j$ і $i > j$ – повторюються для $m > n$. Тому, відкинувши одну частину матриці, визначені одним із обмежень, залишаться усі значення d_{ij} без дублікатів. Для прикладу можна розглянути матрицю 7×8 та 8×7 . Результати продемонстровано в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Матриця значень, отриманих із допоміжних шкал розмірами 7×8

$\begin{matrix} m \\ n \end{matrix}$	0 (0/8)	0,125 (1/8)	0,25 (2/8)	0,375 (3/8)	0,5 (4/8)	0,625 (5/8)	0,75 (6/8)	0,875 (7/8)	1 (8/8)
0 (0/7)	0 (0/56)	0,125 (7/56)	0,25 (14/56)	0,375 (21/56)	0,5 (28/56)	0,625 (35/56)	0,75 (42/56)	0,875 (49/56)	1 (56/56)
0,143 (1/7)	0,143 (8/56)	0,018 (1/56)	0,107 (6/56)	0,232 (13/56)	0,357 (20/56)	0,482 (27/56)	0,607 (34/56)	0,732 (41/56)	0,857 (48/56)
0,286 (2/7)	0,286 (16/56)	0,161 (9/56)	0,036 (2/56)	0,089 (5/56)	0,214 (12/56)	0,339 (19/56)	0,464 (26/56)	0,589 (33/56)	0,714 (40/56)
0,429 (3/7)	0,429 (24/56)	0,304 (17/56)	0,179 (10/56)	0,054 (3/56)	0,071 (4/56)	0,196 (11/56)	0,321 (18/56)	0,446 (25/56)	0,571 (32/56)
0,571 (4/7)	0,571 (32/56)	0,446 (25/56)	0,321 (18/56)	0,196 (11/56)	0,071 (4/56)	0,054 (3/56)	0,179 (10/56)	0,304 (17/56)	0,429 (24/56)
0,714 (5/7)	0,714 (40/56)	0,589 (33/56)	0,464 (26/56)	0,339 (19/56)	0,214 (12/56)	0,089 (5/56)	0,036 (2/56)	0,161 (9/56)	0,286 (16/56)
0,857 (6/7)	0,857 (48/56)	0,732 (41/56)	0,607 (34/56)	0,482 (27/56)	0,357 (20/56)	0,232 (13/56)	0,107 (6/56)	0,018 (1/56)	0,143 (8/56)
1 (7/7)	1 (56/56)	0,875 (49/56)	0,75 (42/56)	0,625 (35/56)	0,5 (28/56)	0,375 (21/56)	0,25 (14/56)	0,125 (7/56)	0 (0/56)

Таблиця 2

Матриця значень, отриманих із допоміжних шкал розмірами 8×7

$\begin{matrix} m \\ n \end{matrix}$	0 (0/7)	0,143 (1/7)	0,286 (2/7)	0,429 (3/7)	0,571 (4/7)	0,714 (5/7)	0,857 (6/7)	1 (7/7)
0 (0/8)	0 (0/56)	0,143 (8/56)	0,286 (16/56)	0,429 (24/56)	0,571 (32/56)	0,714 (40/56)	0,857 (48/56)	1 (56/56)
0,125 (1/8)	0,125 (7/56)	0,018 (1/56)	0,161 (9/56)	0,304 (17/56)	0,446 (25/56)	0,589 (33/56)	0,732 (41/56)	0,875 (49/56)
0,25 (2/8)	0,25 (14/56)	0,107 (6/56)	0,036 (2/56)	0,179 (10/56)	0,321 (18/56)	0,464 (26/56)	0,607 (34/56)	0,75 (42/56)
0,375 (3/8)	0,375 (21/56)	0,232 (13/56)	0,089 (5/56)	0,054 (3/56)	0,196 (11/56)	0,339 (19/56)	0,482 (27/56)	0,625 (35/56)
0,5 (4/8)	0,5 (28/56)	0,357 (20/56)	0,214 (12/56)	0,071 (4/56)	0,071 (4/56)	0,214 (12/56)	0,357 (20/56)	0,5 (28/56)
0,625 (5/8)	0,625 (35/56)	0,482 (27/56)	0,339 (19/56)	0,196 (11/56)	0,054 (3/56)	0,089 (5/56)	0,232 (13/56)	0,375 (21/56)
0,75 (6/8)	0,75 (42/56)	0,607 (34/56)	0,464 (26/56)	0,321 (18/56)	0,179 (10/56)	0,036 (2/56)	0,107 (6/56)	0,25 (14/56)
0,875 (7/8)	0,875 (49/56)	0,732 (41/56)	0,589 (33/56)	0,446 (25/56)	0,304 (17/56)	0,161 (9/56)	0,018 (1/56)	0,125 (7/56)
1 (8/8)	1 (56/56)	0,857 (48/56)	0,714 (40/56)	0,571 (32/56)	0,429 (24/56)	0,286 (16/56)	0,143 (8/56)	0 (0/56)

Із наведених таблиць видно, що для визначення значень матриці $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ не обов'язково визначати усі її елементи, а достатньо лише ті, які знаходяться в зафарбованих клітинках в таблиці 1 або 2. Інші елементи, які знаходяться в не зафарбованих клітинках повністю повторюють попередні елементи. В залежності від розміщення допоміжних шкал, можна легко визначити, які саме їх значення потрібно використати для утворення нової шкали (вектора значень $C = [c_s]_{1 \times N}$).

Якщо уважно розглянути подані вище таблиці 1, 2, то можна помітити закономірність, за якою розташовані елементи матриць. Для прикладу візьмемо матрицю з таблиці 1. Вона побудована із двох допоміжних шкал: перша шкала визначена як $m = 7$ (розміщена вертикально), а друга – на одне значення більше ($n = 8$ розміщена горизонтально), при чому вони сортовані у зростаючому порядку (у загальному випадку, коли $m = n - 1$). Це важливо для побудови самої матриці і приведеного нижче алгоритму визначення вектора значень $C = [c_s]_{1 \times N}$, який і буде складати шкалу основної лінійки. Поставивши за мету вибирати елементи d_{ij} при $i \geq j$ у порядку зростання для вектора відсортованих за зростанням значень без повторень $C = [c_s]_{1 \times N}$, з'являться наступні правила.

Правило 1а:

- Перший елемент (нуль) шкали за вектором $C = [c_s]_{1 \times N}$ знаходиться як $c_1 = d_{11}$.
- Наступні m елементів вектора $C = [c_s]_{1 \times N}$ із матриці $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ їх по чергово вибираються по обмеженню $i = j$, тобто по головній діагоналі.
- Інші необхідні елементи розміщені нижче головної діагоналі і вибираються паралельно її напрямку зверху вниз зліва направо.

- Останній елемент (одиниця) шкали за вектором $C = [c_s]_{1 \times N}$ знаходиться як $c_N = d_{(m+1)1}$.

Коли ж перша шкала визначена як $m = 8$ (розміщена вертикально), а друга – на одне значення менше ($n = 7$, розміщена горизонтально), зміниться порядок розташування елементів d_{ij} на обмеження $i \leq j$, але основний принцип залишиться (у загальному випадку, коли $m = n + 1$). Тоді правила для вектора відсортованих за зростанням значень без повторень $C = [c_s]_{1 \times N}$ виражатимуться так.

Правило 1б:

- Перший елемент (нуль) шкали за вектором $C = [c_s]_{1 \times N}$ знаходиться як $c_1 = d_{11}$.
- Наступні m елементів вектора $C = [c_s]_{1 \times N}$ із матриці $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ їх по чергово вибираються по обмеженню $i = j$, тобто по головній діагоналі.
- Всі інші елементи розміщені вище головної діагоналі і вибирають паралельно її напрямку зверху вниз зліва направо.
- Останній елемент (одиниця) шкали за вектором $C = [c_s]_{1 \times N}$ знаходиться як $c_N = d_{1(n+1)}$.

Після утворення матриці $[g_{si}]_{N \times (\min\{m+1, n+1\})}$ також можна знайти таку закономірність, яка допоможе визначити потрібні значення, не генеруючи повністю величезну матрицю $[g_{si}]_{N \times (\min\{m+1, n+1\})}$. Але для цього спершу побудуємо цю матрицю на прикладі додаткових шкал з 7 та 8 позначками. Вони, в свою чергу, утворять квазілінійну шкалу із 36 позначок. А елементи самої матриці $[g_{si}]_{36 \times 8}$ будуть рівними (див. таблицю 3):

Таблиця 3

Матриця із додатковими значеннями

	0	0,143	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
0	0	0,143	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
0,018	0,018	0,125	0,268	0,411	0,554	0,696	0,839	0,982
0,036	0,036	0,107	0,250	0,393	0,536	0,679	0,821	0,964
0,054	0,054	0,089	0,232	0,375	0,518	0,661	0,804	0,946
0,071	0,071	0,071	0,214	0,357	0,500	0,643	0,786	0,929
0,089	0,089	0,054	0,196	0,339	0,482	0,625	0,768	0,911
0,107	0,107	0,036	0,179	0,321	0,464	0,607	0,750	0,893
0,125	0,125	0,018	0,161	0,304	0,446	0,589	0,732	0,875
0,143	0,143	0	0,143	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857
0,161	0,161	0,018	0,125	0,268	0,411	0,554	0,696	0,839
0,179	0,179	0,036	0,107	0,250	0,393	0,536	0,679	0,821
0,196	0,196	0,054	0,089	0,232	0,375	0,518	0,661	0,804
0,214	0,214	0,071	0,071	0,214	0,357	0,500	0,643	0,786
0,232	0,232	0,089	0,054	0,196	0,339	0,482	0,625	0,768
0,250	0,250	0,107	0,036	0,179	0,321	0,464	0,607	0,750
0,286	0,286	0,143	0	0,143	0,286	0,429	0,571	0,714
0,304	0,304	0,161	0,018	0,125	0,268	0,411	0,554	0,696
0,321	0,321	0,179	0,036	0,107	0,250	0,393	0,536	0,679
0,339	0,339	0,196	0,054	0,089	0,232	0,375	0,518	0,661
0,357	0,357	0,214	0,071	0,071	0,214	0,357	0,500	0,643
0,375	0,375	0,232	0,089	0,054	0,196	0,339	0,482	0,625
0,429	0,429	0,286	0,143	0	0,143	0,286	0,429	0,571
0,446	0,446	0,304	0,161	0,018	0,125	0,268	0,411	0,554
0,464	0,464	0,321	0,179	0,036	0,107	0,250	0,393	0,536
0,482	0,482	0,339	0,196	0,054	0,089	0,232	0,375	0,518
0,500	0,500	0,357	0,214	0,071	0,071	0,214	0,357	0,500
0,571	0,571	0,429	0,286	0,143	0	0,143	0,286	0,429
0,589	0,589	0,446	0,304	0,161	0,018	0,125	0,268	0,411
0,607	0,607	0,464	0,321	0,179	0,036	0,107	0,250	0,393
0,625	0,625	0,482	0,339	0,196	0,054	0,089	0,232	0,375
0,714	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143	0	0,143	0,286
0,732	0,732	0,589	0,446	0,304	0,161	0,018	0,125	0,268
0,750	0,750	0,607	0,464	0,321	0,179	0,036	0,107	0,250
0,857	0,857	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143	0	0,143
0,875	0,875	0,732	0,589	0,446	0,304	0,161	0,018	0,125
1	1	0,875	0,714	0,571	0,429	0,286	0,143	0

У таблиці 3 зібрані усі значення для повної шкали, побудованої з додаткових двох шкал розміром 7×8 . Довжина лінійки рівна одиниці і вміщує шкалу із 57 позначок. Одиниця квантування рівна максимально можливій і складає (4). Матриця $[g_{si}]_{36 \times 8}$ складається із 288 елементів, серед яких нам потрібно лише 21 для даного прикладу. В загальному випадку потрібно (2) елементів. Число повторень співпадає із числом елементів, які "випадають" зі шкали, визначеної матрицею $[d_{ij}]_{m \times n}$ ($i = \overline{1, m}$ та $j = \overline{1, n}$). Потрібні числа виділені у таблиці 3. Тут вони формують групи, які складаються із попередніх груп чисел та додаткового стовпця із новими числами. Остання виділена група чисел формується із 21 числа, які нам потрібно вибрати. Також усі потрібні нам числа знаходяться у останньому стовпці, де від значення 1 віднімаються усі елементи вектора $C = [c_s]_{1 \times N}$. Це означає, що не потрібно будувати повністю матрицю $[g_{si}]_{36 \times 8}$, а лише ту частину, де знаходяться необхідні елементи, тобто $[g_{s8}]_{36 \times 1}$ в даному випадку. Оскільки матриця $[g_{si}]_{N \times (\min\{m+1, n+1\})}$ будується за допомогою вектора $C = [c_s]_{1 \times N}$, то спершу потрібно знайти усі значення вектора. Проте цю процедуру можна опустити шляхом безпосереднього використання допоміжних шкал.

У таблиці 4 виділені ті значення вектора $C = [c_s]_{1 \times 36}$, від яких залежать шукані значення $[g_{s8}]_{36 \times 1}$ із таблиці 3, які потрібно знайти.

Таблиця 4

Значення вектора $C = [c_s]_{1 \times 36}$

$n \backslash m$	0 (0/8)	0,125 (1/8)	0,25 (2/8)	0,375 (3/8)	0,5 (4/8)	0,625 (5/8)	0,75 (6/8)	0,875 (7/8)	1 (8/8)
0 (0/7)	0 (0/56)	0,125 (7/56)	0,25 (14/56)	0,375 (21/56)	0,5 (28/56)	0,625 (35/56)	0,75 (42/56)	0,875 (49/56)	1 (56/56)
0,143 (1/7)	0,143 (8/56)	0,018 (1/56)	0,107 (6/56)	0,232 (13/56)	0,357 (20/56)	0,482 (27/56)	0,607 (34/56)	0,732 (41/56)	0,857 (48/56)
0,286 (2/7)	0,286 (16/56)	0,161 (9/56)	0,036 (2/56)	0,089 (5/56)	0,214 (12/56)	0,339 (19/56)	0,464 (26/56)	0,589 (33/56)	0,714 (40/56)
0,429 (3/7)	0,429 (24/56)	0,304 (17/56)	0,179 (10/56)	0,054 (3/56)	0,071 (4/56)	0,196 (11/56)	0,321 (18/56)	0,446 (25/56)	0,571 (32/56)
0,571 (4/7)	0,571 (32/56)	0,446 (25/56)	0,321 (18/56)	0,196 (11/56)	0,071 (4/56)	0,054 (3/56)	0,179 (10/56)	0,304 (17/56)	0,429 (24/56)
0,714 (5/7)	0,714 (40/56)	0,589 (33/56)	0,464 (26/56)	0,339 (19/56)	0,214 (12/56)	0,089 (5/56)	0,036 (2/56)	0,161 (9/56)	0,286 (16/56)
0,857 (6/7)	0,857 (48/56)	0,732 (41/56)	0,607 (34/56)	0,482 (27/56)	0,357 (20/56)	0,232 (13/56)	0,107 (6/56)	0,018 (1/56)	0,143 (8/56)
1 (7/7)	1 (56/56)	0,875 (49/56)	0,75 (42/56)	0,625 (35/56)	0,5 (28/56)	0,375 (21/56)	0,25 (14/56)	0,125 (7/56)	0 (0/56)

Таким чином, вибираючи виділені значення в порядку спадання з таблиці 3 і почергово віднімаючи їх від максимального значення шкали, тобто від одиниці, отримаємо пропущені елементи для лінійної шкали. Щоб вибрати виділені елементи d_{ij} , ($i = \overline{1, m+1}$ та $j = \overline{1, n+1}$) в потрібному порядку, слід скористатись наступними правилами.

Правило 2:

- Першим елементом є d_{m2} , визначений по формулі (5).
- Наступні елементи із матриці $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ почергово вибираються паралельно головній діагоналі знизу вгору, справа наліво, обмежені нерівностями $1 < i < m+1, 1 < j < n$, тобто по головній діагоналі.
- Останній $m-1$ елемент визначений рівністю $i = j, 1 < i < m+1, 1 < j < n$.
- Останній елемент d_{22} матриці $[d_{ij}]_{(m+1) \times (n+1)}$ визначений по формулі (5).

Ці правила визначені для $m = n - 1$.

Правила 1а та 2 в сукупності визначають повну лінійну шкалу з кількістю поділок $N = m \cdot n + 1$ та одиницею квантування (4). Алгоритм побудови цієї шкали зображено на рисунку 6.

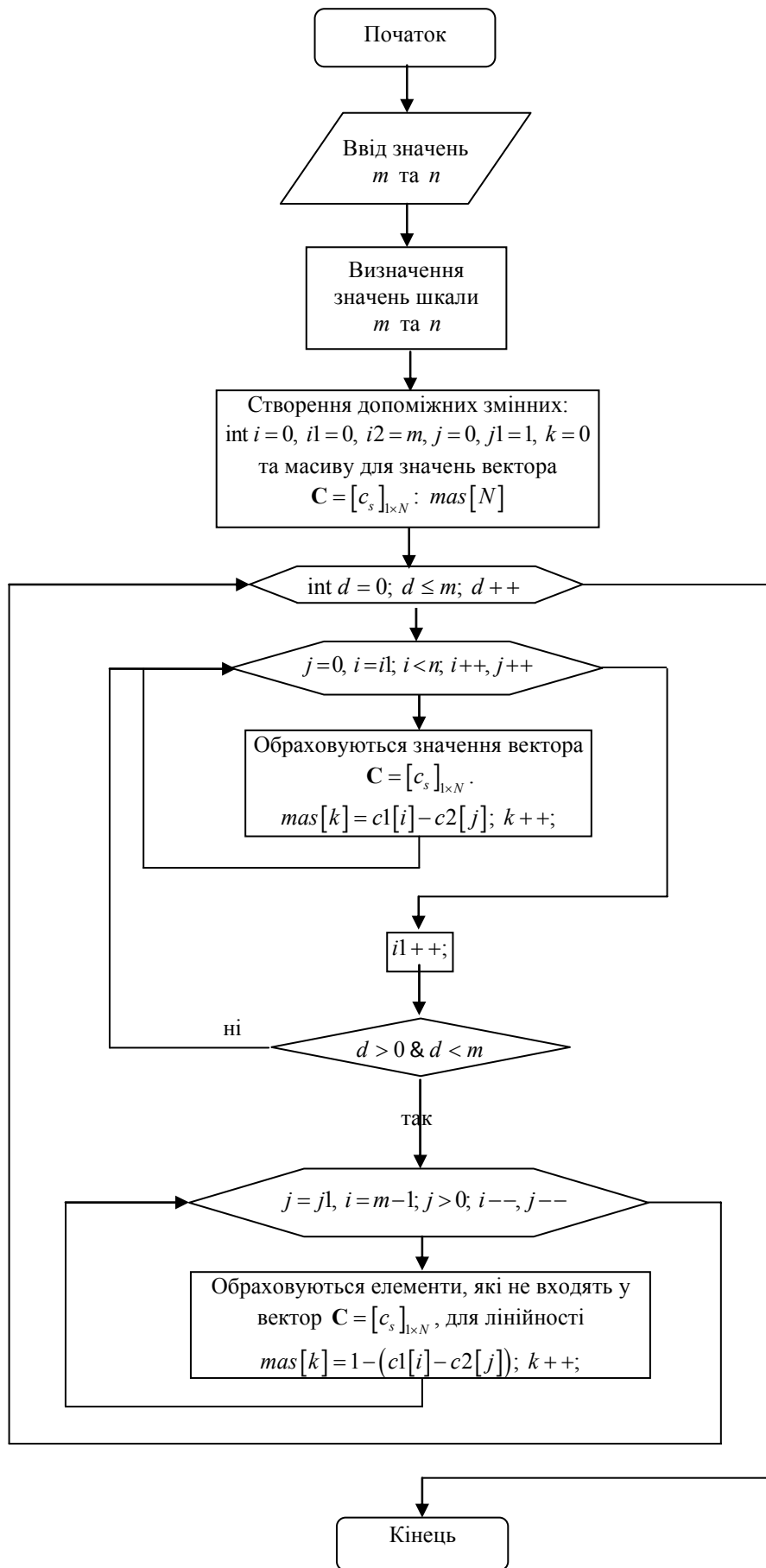


Рис. 6. Блок-схема сукупності правил 1а та 2 для побудови лінійної рівномірної шкали

Висновки

Описаний підхід надає можливість створення виміральної лінійки з підвищеною точністю для

перетворення інформації, використовуючи еквівалентний набір резисторів, порівняно з аналогічними ЦАП-АЦП. Результати, відображені в рисунках у формі графіків, підтверджують лінійність отриманих шкал. Оскільки відповідний метод давав лише часткову лінійність, було розроблено допоміжну частину для подолання цієї проблеми. У результаті виконаної роботи встановлено, що:

1) лінійність шкали збільшується із $m+n$ або $\frac{(m+2) \cdot (n+2)}{4} - 1$ до $m \cdot n$, тобто зберігається

стотидсоткова (повна) лінійність;

2) враховуючи п. 1, одиниця квантування рівна (4) і зберігається по всій шкалі;

3) кількість позначок повної лінійки збільшилась зі значення (1) до (7), це на (2) позначок більше.

Розроблений алгоритм послідовного визначення поділок шкали (рис. 6) залежно від розмірів допоміжних шкал дозволяє в разі пришвидшити побудову основної шкали. На основі цього методу вимірювання планується змоделювати відповідний АЦП, а також створити діючий прототип апарату.

Література

1. Kester W. Analog-digital conversion / W. Kester. Analog Devices, Inc. – USA. – 2004. – 1138 с.
2. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : [навчальний посібник] / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
3. Гуляс О. Й. Вимірювання постійної напруги методом коінциденції / О. Й. Гуляс, О. П. Войтюк, І. В. Троцишин // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 89 – 93.
4. Троцишин І. В. Шляхи підвищення роздільної здатності шкали вимірювального перетворення ЦАП і АЦП / І. В. Троцишин, О. П. Войтюк, Н. І. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 236 – 242.
5. Варешко В. О. Використання допоміжної шкали для підвищення точності вимірювальних перетворювачів інформації / В. О. Варешко // Збірник наукових праць АПКТ. – Хмельницький, 2013. – С. 48 – 54.
6. Варешко В. О. Лінійна рівномірна шкала для АЦП прямого перетворення з використанням двох наборів резисторів, що відрізняються на одиницю / В. О. Варешко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2012. – № 5. – С. 217 – 221.
7. Варешко В. А. О возможности линеаризации равномерной шкалы для АЦП прямого преобразования с использованием двух наборов резисторов / В. А. Варешко // Международная научно-практическая конференция “Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов”. – Пенза, 2012. – С. 91 – 100.
8. Троцишин І. В. Напрямки квантової теорії вимірювального перетворення фізичних величин на основі єдиної дробово-раціональної шкали вимірювань / І. В. Троцишин // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2011. – № 1. – С. 196 – 201.
9. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / У. Кестер. – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.

References

1. Kester W. Analog-digital conversion / W. Kester. Analog Devices, Inc. – USA. – 2004. – 1138 с.
2. Metrolohichne zabezpechennya vymiryuvan' i kontrolyu : [navchal'nyy posibnyk] / Ye. T. Volodars'kyu, V. V. Kukharchuk, V. O. Podzharenko, H. B. Serdyuk. – Vinnytsya : VDTU, 2001. – 219 p.
3. Hulyas O. Y. Vymiryuvannya postiyanoi napruhy metodom koinsydentsiyi / O. Y. Hulyas, O. P. Voytyuk, I. V. Trotsyshyn // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2011. – № 1. – pp. 89 – 93.
4. Trotsyshyn I. V. Shlyakhy pidvyshchennya rozdil'noyi zdatnosti shkaly vymiryuval'noho peretvorennya TsAP i ATsP / I. V. Trotsyshyn, O. P. Voytyuk, N. I. Trotsyshyna // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2010. – № 2. – pp. 236 – 242.
5. Varesheko V. O. Vykorystannya dopomizhnoyi shkaly dlya pidvyshchennya tochnosti vymiryuval'nykh peretvoryuvachiv informatsiyi / V. O. Varesheko // Zbirnyk naukovykh prats' APKT. – Khmel'nyts'kyu, 2013. – pp. 48 – 54.
6. Varesheko V. O. Liniyna rivnomirna shkala dlya ATsP pryamoho peretvorennya z vykorystanniam dvokh naboriv rezystoriv, shcho vidriznyayut'sya na odynitsyu / V. O. Varesheko // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2012. – № 5. – pp. 217 – 221.
7. Varesheko V. A. O vozmozhnosti lynearyzatsyyi ravnomernoy shkaly dlya ATsP pryamoho preobrazovannya s yspol'zovanyem dvukh naborov rezystorov / V. A. Varesheko // Mezhdunarodnaya nauchno-praktycheskaya konferentsyya “Aktual'nye problemy ynzhenerykh nauk v oblasti promyshlennosti, ekolohyy u okhrany vodnykh resursov”. – Penza, 2012. – pp. 91 – 100.
8. Trotsyshyn I. V. Napryamky kvantovoyi teoriyi vymiryuval'noho peretvorennya fizychnykh velychyn na osnovi yedynoyi drobovo-ratsional'noyi shkaly vymiryuvan' / I. V. Trotsyshyn // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2011. – № 1. – pp. 196 – 201.
9. Kester W. Proektyrovanye system tsyfrovoy y smeshannoy obrabotky syhnalov / W. Kester. – M. : Tekhnosfera, 2010. – 328 p.

Рецензія/Peer review : 15.09.2014 р.

Надрукована/Printed : 1.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., доцент В. В. Романюк