

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-03>

УДК 681.121.89.082.4

Роман Віталій Іванович, доцент, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-8546-6752>

Ілючок Віктор Олександрович, студент

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Роман В.І., Ілючок В.О. Комп'ютерна програма для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів. В роботі розроблено аналітичні залежності для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів 5-ти та 6-ти канальних хордових ультразвукових витратомірів. Також реалізовано алгоритм розрахунку рекурентних рівнянь поліному Якобі. Це дозволило удосконалити алгоритм проектування багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів. Для реалізації цього алгоритму удосконалено комп'ютерну програму для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів.

Ключові слова: проектування, комп'ютерна програма, ультразвуковий витратомір, акустичні канали, хордова схема, числові методи інтегрування.

Roman V., Ilyuchok V. Software for designing of multipath ultrasonic flow meters. Analytical dependencies for calculating location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of 5- and 6-channel chordal ultrasonic flow meters were developed in the work. The algorithm for calculating the recurrent equations of the Jacobi polynomial is also implemented. This made it possible to improve the designing algorithm of multipath chordal ultrasonic flow meters. To implement this algorithm, a software for designing multipath ultrasonic flow meters has been improved.

Keywords: designing, software, ultrasonic flow meter, acoustic paths, chordal scheme, numerical integration methods.

Проблематика питання. Розвиток комп'ютерних технологій відкрив для проектувальників, науковців (аспірантів та студентів) та виробників, можливість автоматизувати розрахункові процеси – шляхом створення вузькоспеціальних прикладних програм з нуля. Якщо говорити про галузь вимірювання витрати із застосуванням ультразвукових витратомірів (УЗВ), при проектування та симуляції роботи даного типу витратомірів, виникає потреба попереднього розрахунку їх конструктивних характеристик. Зокрема, це стосується розрахунку координат розташування (відстань до осі труби) та вагових коефіцієнтів акустичних каналів (АК) багатоканальних хордових УЗВ. Згідно ISO 7089-1 [1] цей розрахунок виконується, зокрема, із застосуванням числових методів інтегрування (ЧМІ), що вимагає великих затрат людського часу, якщо існує циклічність процесу.

Зважаючи на вище сказане, в роботі [2] було обґрунтовано розробку комп'ютерної програми (калькулятора), яка б у зручній формі дозволяла користувачу швидко та миттєво отримувати згадані конструктивні характеристики УЗВ на базі ЧМІ. Основою розробленої програми стали три класичні ЧМІ – Гауса-Лежандра, Гауса-Чебишева та Гауса-Якобі. В роботі [3] нами продовжено ці дослідження, і після додаткового аналізу наукової літератури, обґрунтовано удосконалення цієї програми, з метою включення до її логіки нових методів, які виникли як модифікація чи удосконалення класичних ЧМІ, і часто застосовуються на практиці. Цими методами, які ми додали до програми, стали ЧМІ Гарріса-Еванса та ЧМІ OWICS.

В даній, заключній роботі, нами поставлено за мету фінальне удосконалення програми – збільшення кількості АК УЗВ з 4 до 6 каналів (подальше збільшення кількості АК немає сенсу щодо діаметру типових вузлів комерційного обліку) для всіх існуючих (в програмі) методів розрахунку (класичних ЧМІ та розроблених на їх основі методів). Також в роботі представлено удосконалений алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ на базі ЧМІ та інструкція користувача до розробленої на його базі комп'ютерної програми.

Викладення основного матеріалу. Для високоточного обліку енергоносіїв (в комерційних цілях), зокрема газоподібних, рекомендовано застосовувати багатоканальні УЗВ (в якому застосовано більше ніж один АК) [1]. Для обчислення об'ємної витрати багатоканальних хордових УЗВ (q_{USM}), в яких АК лежать в одній площині на певні відстані від осі труби, може бути застосована формула виду [4]:

$$q_{USM} = \pi R^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2-x_i^2}}{\pi R} w_i u h_i \right), \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус ВТ (або корпусу УЗВ); x_i , w_i – координата розташування (відстань між площиною в якій лежить АК і віссю труби – див.рис.1) та ваговий коефіцієнт i -го АК; $u h_i$ – усереднена вздовж i -го хордового АК швидкість потоку; N – кількість АК.

Якби УЗВ мав два АК (рис.1), то формулу (1) можна було б записати наступним чином:

$$q_{USM} = \pi R^2 \left(\frac{2\sqrt{R^2-x_1^2}}{\pi R} w_1 u h_1 + \frac{2\sqrt{R^2-x_2^2}}{\pi R} w_2 u h_2 \right).$$

Значення x , w та N є конструктивними характеристиками багатоканального хордового УЗВ [1].

Аналізуючи наукові літературні джерела [4-7] встановлено, що значення x та w розраховують із застосуванням класичних ЧМІ та методів, які були розроблені на їх основі (будемо їх називати удосконалені ЧМІ). Використання ЧМІ для задач багатоканальної ультразвукової витратометрії досліджено і представлено також у звіті Американської газової асоціації (AGA Report No.7) та технічній монографії Європейської групи по дослідженню газу (GERG Technical Monograph No.11).

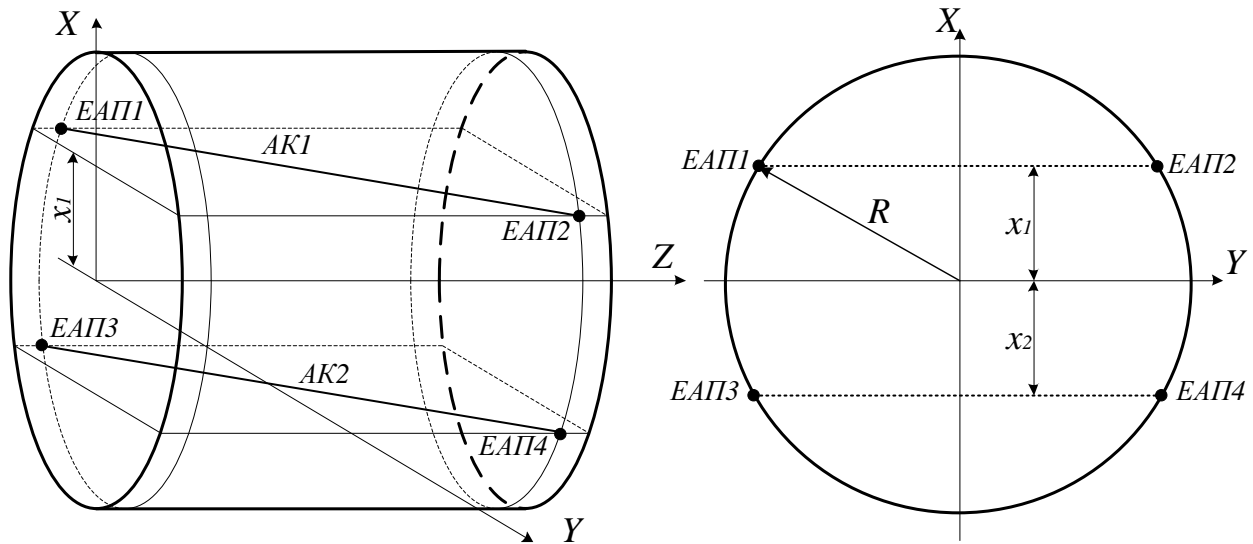


Рисунок 1 – Спрощена схема просторового розташування АК двоканального хордового УЗВ:
 ЕАП – електроакустичний перетворювач

Можуть існувати випадки, коли ЧМІ зовсім не застосовують, або використано інакший (комбінований) математичний апарат [8]. До прикладу, АК УЗВ можна розміщувати відносно осі потоку пропорційно до їх кількості (однакова відстань між АК). Це стосується і визначення вагових коефіцієнтів – кожен АК має однакову вагу, яка залежить тільки від кількості (N). В такому випадку калібрування спроектованого УЗВ вкрай необхідне, а методи (в контексті даної роботи) будуть носити назву – комбіновані.

Зважаючи на вище сказане, нами запропоновано удосконалену класифікацію методів проектування багатоканальних хордових УЗВ, зображену на рис.2.



Рисунок 2 – Класифікація методів проектування багатоканальних хордових УЗВ

Проаналізувавши науково-технічні джерела [14-8] щодо застосування ЧМІ для задач ультразвукової витратометрії (визначення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів АК (w) в залежності від значення (N), нами удосконалено алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ на базі ЧМІ.

Розглянемо детально етапи цього алгоритму:

1. Вибрати кількість хордових АК УЗВ (ввід значення змінної N з діапазону від 2 до 6).

2. Вибрати ЧМІ (ввід значення змінної M):

2.1. Якщо вибрано ЧМІ Гауса-Чебишева, ЧМІ Гауса-Лежандра, ЧМІ Гарріса-Еванса чи метод OWICS, то значення x та w обираємо звернувшись до даних математичного довідника [9] та наукової праці [6], де вони вже розраховані і зведені у таблиці. В табл.1 наведено конкретні значення x та w за цими ЧМІ для УЗВ з $N = 2, 3, 4, 5$ та 6. Для ЧМІ Гарріса-Еванса дані при $N = 6$ відсутні.

2.2. Якщо вибрано ЧМІ Гауса-Якобі, то далі необхідно:

2.2.1. Вибрати степінь вагової функції ортогонального поліному Якобі (вибір значення k з діапазону від -1 до 1 [5, 9]).

2.2.2. Побудувати рекурентне рівняння поліному Якобі за спрощеною формулою (2), в якій «рідні» коефіцієнти α та β [7] замінені на k [5, 7, 9]:

$$\left[\begin{array}{l} p_{j+1} = \frac{e_j}{c_j} x p_j - \frac{f_j}{c_j} p_{j-1}; \quad (p_{j-1} \equiv 0, p_0 \equiv 1) \\ c_j = (j+1)(j+2k+1) \\ e_j = (2j+2k+1)(j+k+1) \\ f_j = (j+k)(j+k+1) \\ j = 0, \dots, N-1 \end{array} \right. \quad (2)$$

До прикладу, нами побудовано рекурентні рівняння полінома Якобі згідно формули (2) для $k = 0,5$ при кількості АК $N = 1, 2, 3, 4, 5$ та 6. Ось ці рівняння:

$$p_1 = 3x/2$$

$$p_2 = 5x^2/2 - 5/8$$

$$p_3 = 35x^3/8 - 35x/16$$

$$p_4 = 63x^4/8 - 189x^2/32 + 63/128$$

$$p_5 = 231x^5/16 - 231x^3/16 + 693x/256$$

$$p_6 = 429x^6/16 - 2145x^4/64 + 1287x^2/128 - 429/1024$$

Для розрахунку застосовано розроблену нами програму в середовищі MATLAB, блок-схема алгоритму якої зображена на рис.3. Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння з рівняннями p_1, p_2, p_3, p_4 , що наведені в науковій праці [5].

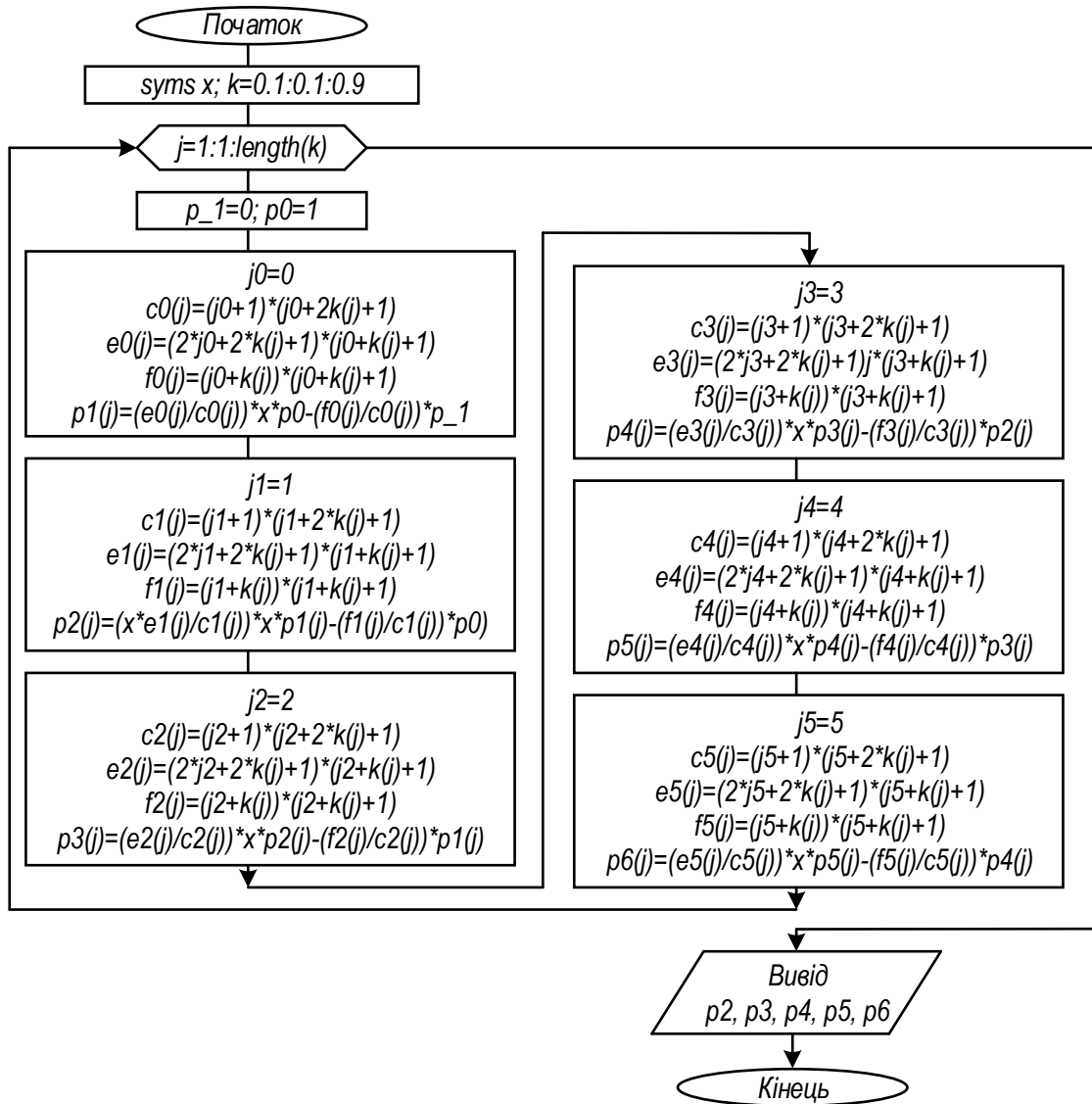


Рисунок 3 – Блок-схема програми для побудови рекурентних рівнянь полінома Якобі згідно формули (2) при $k = 0, 1 \dots 0,9$ та $N = 2 \dots 6$

2.2.3. Знайти корені поліному Якобі любым доступним методом [9], які й будуть значеннями координат розташування АК УЗВ.

До прикладу, нами знайдено корені виведених в п.2.2.2 поліномів Якобі із застосуванням функції *roots* середовища MATLAB:

- $x(N = 2)$: 0,5; -0,5
- $x(N = 3)$: 0; 0,7071; -0,7071
- $x(N = 4)$: -0,8090; 0,8090; -0,30901; 0,30901
- $x(N = 5)$: 0; -0,8660; -0,5; 0,8660; 0,5
- $x(N = 6)$: -0,9009; 0,9009; -0,6234; 0,6234; -0,2225; 0,2225

Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння з даними, що наведені в наукових працях [5-7].

2.2.4. Розрахувати вагові коефіцієнти АК УЗВ за формулою (3) [5-7]:

$$w_j = \frac{1}{w(x_j)} \int_{-1}^1 W(x) PL_j(x) dx; \quad (j = 1, 2, \dots N), \quad (3)$$

де $W(x) = (1 - x^2)^k$ – вагова функція поліному Якобі; $PL_j(x)$ – поліном Лагранжа виду [5, 9]:

$$PL_j(x) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^N \frac{x-x_j}{x_j-x_k}$$

До прикладу, нами розраховано значення вагових коефіцієнтів (w) для $k = 0,5$ та координат розташування, отриманих в п.2.2.3.

$w(N = 2)$: 0,9069; 0,9069

$w(N = 3)$: 0,7854; 0,5554; 0,5554

$w(N = 4)$: 0,3693; 0,3693; 0,5976; 0,5976

$w(N = 5)$: 0,5236; 0,2618; 0,4534; 0,2618; 0,4534

$w(N = 6)$: 0,1947; 0,1947; 0,3509; 0,3509; 0,4375; 0,4375

Для розрахунку застосовано розроблену нами програму в середовищі MATLAB. Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння зі значеннями в [5, 9].

Таблиця 1. Координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ

N	ЧМІ Гауса-Чебишева [9, табл.25.5]		ЧМІ Гауса-Лежандра [9, табл.25.4]		ЧМІ Гарріса-Еванса [6]		OWICS [5]	
	x	w	x	w	x	w	x	w
2	±0,5773	1	±0,5773	1	±0,4782	0,8695	±0,4879	0,8908
3	±0,7071	2/3	±0,7745	0,5555	±0,7794	0,5035	±0,6956	0,5537
	0	2/3	0	0,8888	0	0,9304	0	0,7687
4	±0,7946	0,5	±0,8611	0,3478	±0,8893	0,2273	±0,7996	0,3719
	±0,1875	0,5	±0,3399	0,6521	±0,4067	0,7441	±0,3038	0,5882
5	±0,8325	0,4	±0,9062	0,2369	±0,9474	0,1243	±0,8585	0,2654
	±0,3745	0,4	±0,5385	0,4786	±0,6860	0,4657	±0,4932	0,4489
	0	0,4	0	0,5689	0	0,8112	0	0,5158
6	±0,8662	0,33	±0,9325	0,1713	-	-	±0,8949	0,1984
	±0,4225	0,33	±0,6612	0,3601	-	-	±0,6167	0,3489
	±0,2666	0,33	±0,2386	0,4680	-	-	±0,2197	0,4322

З метою удосконалення алгоритму, а саме етапів 2.2.2-2.2.4, в роботі [10] авторами отримано масиви значень x та w при $N = 2, 3$ та 4 для діапазону значень $k = 0,1 \dots 0,9$. Шляхом апроксимації цих масивів поліномами різного ступеня, авторам отримано відповідні аналітичні залежності $x = f(k)$ та $w = f(k)$. Використовуючи подібний підхід, нами в даній роботі розроблено аналітичні залежності для $N = 5$ та 6 в діапазоні значень $k = 0,1 \dots 0,9$:

N = 5:

$$x_{1,5} = 0,0084k^2 - 0,0842k + 0,906$$

$$x_{2,4} = 0,0124k^2 - 0,0809k + 0,537$$

$$x_3 = 0$$

$$w_{1,5} = -0,0153k^2 + 0,0528k + 0,2392$$

$$w_{2,4} = 0,0057k^2 - 0,052k + 0,478$$

$$w_3 = 0,0158k^2 - 0,0955k + 0,5674$$

N = 6:

$$x_{1,6} = 0,0061k^2 - 0,0670k + 0,933$$

$$x_{2,5} = 0,0107k^2 - 0,0796k + 0,661$$

$$x_{3,4} = 0,0045k^2 - 0,0332k + 0,238$$

$$w_{1,6} = -0,0126k^2 + 0,0506k + 0,1726$$

$$w_{2,5} = 0,0010k^2 - 0,0210k + 0,3611$$

$$w_{3,4} = 0,0088k^2 - 0,0633k + 0,467$$

На базі цього удосконалено алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ, а також на базі аналізу існуючих програмних продуктів в галузі ультразвукової витратометрії, викладених в роботі [2], нами розроблено комп'ютерну програму для проектування багатоканальних хордових УЗВ. Для цього використано безкоштовне середовище розробки Visual Studio Community 2019 та мову програмування C#. Отримана програма отримала назву AutoDesignUSM, а інструкція для роботи з нею в консольному режимі спілкування складається з наступних кроків:

Крок 1. Програма просить користувача ввести значення внутрішнього радіус ВТ (r) в міліметрах «Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm:». Введені значення з клавіатури зчитується функцією Console.ReadLine(), і присвоюється змінній r типу double з використанням функції Double.Parse(). У тому випадку, якщо введені значення радіуса виявляться від'ємним або рівним нулю, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! The value of the internal radius is negative or zero. Enter the correct value». Поки користувач не введе

коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 2. Програма просить користувача ввести значення, що відповідає кількості АК УЗВ (N): «Enter the number of acoustic paths USM ($N = 2, 3, 4, 5$ or 6):». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній N типу `int` з використанням функції `Int32.Parse()`. У тому випадку, якщо введене значення виявиться меншим за 2 або більшим за 6, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! Enter the correct number of acoustic paths». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 3. Програма просить користувача ввести ціле число, яке відповідає типу ЧМІ (M): «Choose a NMI (enter the number): 1 – Gauss-Legendre; 2 – Gauss-Chebyshev; 3 – Gauss-Jacobi; 4 – Harris-Evans; 5 – OWICS». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній M типу `int` з використанням функції `Int32.Parse()`. У тому випадку, якщо введене значення виявиться меншим за 1 або більшим за 5, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! Enter the number of the available method». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 4. Якщо користувач обрав ЧМІ Гауса-Якобі, тобто змінна $M = 3$, програма просить ввести значення k : «Since you have chosen a Gauss-Jacobi NMI, you need to enter the degree of weight function polynomial Jacobi (k) from the range of $0,1...0,9$:». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній k типу `double` з використанням функції `Double.Parse()`.

Крок 5. На екрані з'являються результати, представлені на рис.4. Серед них можна побачити:

- 1) масив значень відносних координат розташування АК УЗВ x ;
- 2) масив значень реальних координат розташування АК УЗВ X ;
- 3) масив значень вагових коефіцієнтів АК УЗВ w .

```
r: 100 mm
N: 2
NIM: Gauss-Legendre
x: 0,5774 -0,5774
X: 57,7400 -57,7400 (mm)
w: 1,0000 1,0000

To repeat - enter 1. To exit - enter 0 and then any key:
```

Рисунок 4 – Вікно виводу програми AutoDesignUSM

Крок 6. Програма пропонує користувачу зробити вибір – повторення попередніх кроків, чи закінчення роботи і вихід з програми: «To repeat – enter 1. To exit – enter 0 and then any key:». Повторення реалізується із застосуванням оператора `goto`, а вихід – за допомогою функції `Console.ReadKey()`. Якщо користувач вибере третій варіант (введе значення відмінне від 1 та 0), то програма виведе повідомлення «Wrong! Enter the correct value». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись.

Блок-схема алгоритму розробленої програми AutoDesignUSM наведено на рис.5. У тому випадку, якщо користувач увів r та N , і обрав $M = 1, 2, 4$ та 5 , значення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів (w) АК УЗВ отримуємо за даними з таблиці 1.1. Значення реальних координат розташування (X) АК УЗВ при цьому, отримуємо множенням x на внутрішній радіус (r) вимірювального трубопроводу. Для складнішого випадку, коли значення $M = 3$ (відповідає ЧМІ Гауса-Якобі), і де користувач додатково повинен ввести значення k , значення x та w отримано за відповідними аналітичними залежностями $x = f(k)$ та $w = f(k)$ [10], деякі з яких розроблено та представлено нами в цій роботі (для N рівне 5 та 6). Опісля, значення X так само отримуємо множенням x на радіус r . Переключення між методами відбувається за допомогою оператора-перемикача `switch case`.

На рис.6 зображено вікно програми AutoDesignUSM в режимі «запиту».

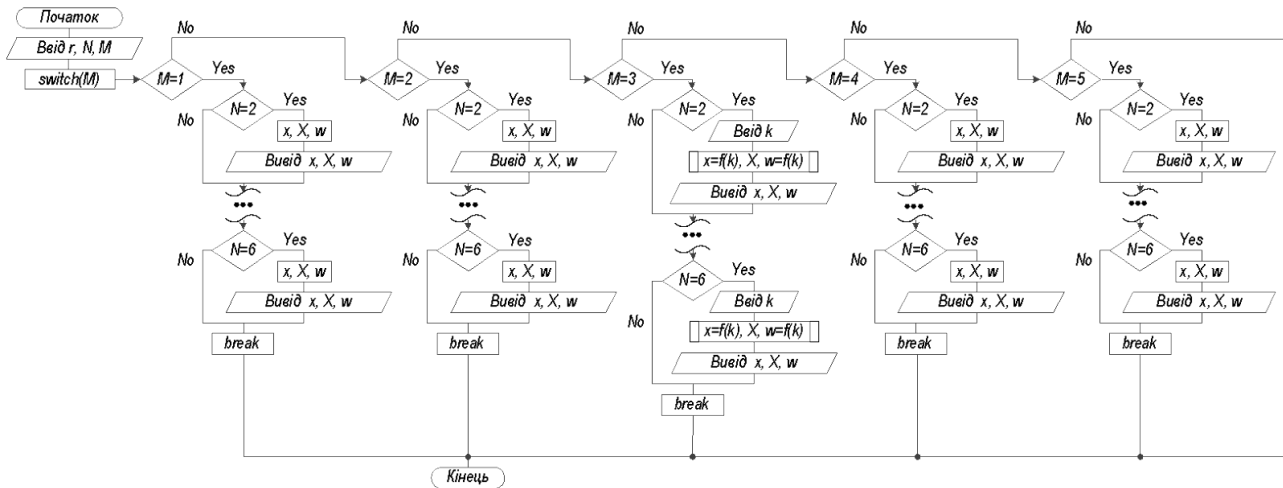


Рисунок 5 – Спрощена блок-схема «логіки» програми AutoDesignUSM

```

*****
*                               *
*           AutoDesignUSM       *
* * The program for calculating the coordinates of the location (x) *
* * and the weighing coefficients (w) of the acoustic paths of *
* * chordal ultrasonic flow meters (USM). Out of user choice, *
* * the calculation is performed by one of the numerical *
* * integration method (NIM) - Gauss-Legendre, Gauss-Chebyshev, *
* * Gauss-Jacobi, Harris-Evans and OWICS. *
* *                               *
* ----- *
* * Lviv Polytechnic National University, 2023 *
* *                               *
*****

1. Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm: 100

2. Enter the number of acoustic paths USM (N = 2, 3, 4, 5 or 6): 2

3. Choose a NIM (enter the number):
    1 - Gauss-Legendre
    2 - Gauss-Chebyshev
    3 - Gauss-Jacobi
    4 - Harris-Evans
    5 - OWICS
    3
    
```

Рисунок 6 – Вікно програми AutoDesignUSM в режимі конкретного «запиту»

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Опісля проведеного аналіз науково-технічної літератури за темою роботи, авторами запропоновано удосконалити класифікацію методів проектування багатоканальних хордових УЗВ, що дозволяє виокремити ЧМІ, які найчастіше використовують для розрахунку параметрів рівняння об'ємної витрати витратомірів даного типу. Також авторами, шляхом розробки нових аналітичних залежностей $x = f(k)$ та $w = f(k)$ для 5-ти та 6-ти каналних УЗВ, удосконалено алгоритм проектування витратомірів на базі ЧМІ. Даний алгоритм реалізовано в удосконаленій комп'ютерній програмі, яка в консольному режимі розраховує значення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів (w) АК для проектування багатоканальних УЗВ. Для роботи з програмою розроблено інструкцію користувача.

Перспективою подальших досліджень є розробка візуального інтерфейсу користувача та розширення функціоналу програми AutoDesignUSM – автоматизований розрахунок теоретичного калібрувального коефіцієнта УЗВ обраного типу та конструкції (одно- та багатоканальні).

Список бібліографічного опису

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. Journal of Energy Engineering and Control Systems, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
3. Роман, В., та Ілючок, В. (2023). Удосконалення комп'ютерної програми для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів. КОМП'ЮТЕРНО-

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (50), 157-162. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24>

4. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.
5. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
6. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. Flow Measurement Instrumentation, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
7. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
8. Lynnworth, A.M. and Lynnworth, L.C. (1985). Calculated Turbulent-Flow Meter Factors for Nondiametral Paths Used in Ultrasonic Flowmeters. J. Fluids Eng. Mar, 107(1), 44-48.
9. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS.
10. Роман, В., та Іжик, А. (2021). Аналітичні залежності розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (43), 122-128. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-20>

References

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. Journal of Energy Engineering and Control Systems, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
3. Roman, V., and Iliuchok, V. (2023). Improving of the software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 157-162. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24> (Ukrainian)
4. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.
5. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
6. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. Flow Measurement Instrumentation, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
7. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
8. Lynnworth, A.M. and Lynnworth, L.C. (1985). Calculated Turbulent-Flow Meter Factors for Nondiametral Paths Used in Ultrasonic Flowmeters. J. Fluids Eng. Mar, 107(1), 44-48.
9. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS.
10. Roman, V., and Izhik, A. (2021). Analytical dependences of calculation of location coordinates and weight coefficients of acoustic paths of ultrasonic flowmeters. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (43), 122-128. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-20> (Ukrainian)