

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ВУЗЛІВ ОБЛІКУ ГАЗУ ТА ПУНКТИВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ГАЗУ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Запропоновано новий метод визначення конфігурації вузлів обліку природного газу та пунктів вимірювання витрат газу, який враховує, окрім традиційних підходів до розв'язку цієї задачі на основі даних про технічні та метрологічні характеристики засобів вимірювань, також критерій сумарної вартості вимірювальних пристроїв в умовах невизначеності. Як вимірювальні прилади в статті розглядаються витратоміри змінного перепаду тиску, турбінні лічильники газу та ультразвукові витратоміри, які найчастіше застосовуються під час спорудження, ремонту або реконструкції вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрати газу. Сформульовано задачу вибору оптимальної конфігурації вузла обліку природного газу за умови, що параметри в оптимізаційній задачі, які зумовлені похибками вимірювань, трактуються як нечіткі числа  $(L-R)$ -типу. Показано, що початкова задача трансформується в задачу цілочислового програмування, у якій коефіцієнти обмеження для визначення необлікованих витрат, залежать від параметрів трикутної функції належності, що апроксимована гаусовою функцією. Задачу визначення оптимальної кількості вимірювальних приладів для вузлів обліку природного газу або пунктів вимірювання витрат газу, сформульованої в цій роботі, розв'язано за використання програмного середовища MatLab. Ефективність розробленого програмного забезпечення оптимізаційної задачі перевірено на конкретному прикладі вибору оптимальної конфігурації вузла обліку за критерієм мінімальних фінансових затрат на оснащення вузла обліку пристроями обліку природного газу для однієї з газорозподільних станцій. Здійснено порівняльний аналіз двох варіантів оптимізаційної задачі: у детермінованій постановці і з урахуванням нечіткості коефіцієнтів, спричиненої похибками вимірювань, в обмеженні, зумовленому необлікованими витратами.

Для перевірки роботи запропонованого методу і розробленого програмного забезпечення використано вихідні дані, що враховують реальні умови експлуатації вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрати газу. Використання запропонованого методу дозволить знизити витрати на спорудження, ремонт або реконструкцію вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрати газу.

**Ключові слова:** природний газ, облік газу, вимірювальний пристрій, похибки вимірювань, нечіткі параметри.

### Вступ

Питання економії та раціонального використання енергоносіїв є надзвичайно важливою задачею для газовидобувних, газотранспортних та інших підприємств та організацій в Україні, особливо в умовах постійних атак країни-агресора на об'єкти нафтогазового комплексу. Задача забезпечення підвищення точності та достовірності обліку природного газу в точках входу до і виходу з газотранспортної системи України є однією з найпріоритетніших. Цю задачу розв'язують зокрема шляхом вибору та встановлення сучасних високоточних засобів вимірювання.

Питання щодо дослідження методів та засобів вимірювання на точність і достовірність процесів визначення обсягів природного газу висвітлені у роботах багатьох українських науковців, серед яких Є. П. Пістун, Л. В. Лесовий, Ф. В. Матіко [1], [2], Й. Й. Білинський [3], М. П. Андрійшин [4], І. С. Кисіль, О. Є. Середюк [5], [6] та інші. Також ця тема широко висвітлена в публікаціях

зарубіжних авторів [7]—[11].

На сьогоднішній день для забезпечення обліку газу у складі вузлів обліку та пунктів вимірювання його витрати широко використовуються витратоміри змінного перепаду тиску, турбінні лічильники та ультразвукові витратоміри. Кожен із зазначених засобів вимірювання має як певні переваги, так і недоліки, які описано авторами в роботі [12], а вибір конкретного засобу вимірювання або комбінації цих засобів наразі значною мірою залежить від експертної думки працівників підприємств та організацій, які відповідають за питання обліку газу, а також представників проєктних організацій, залучених до процесу будівництва, ремонту та реконструкції вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрати. В роботі [12] авторами запропоновано визначати оптимальну кількість вимірювальних трубопроводів у складі вузлів обліку або пунктів вимірювання витрати газу з відповідними засобами обліку природного газу з урахуванням не тільки технічних та метрологічних характеристик засобів вимірювання, а також і з урахуванням їхньої вартості. У цій роботі задачу оптимального вибору (оптимізаційна задача) розв'язано для випадку нечіткості коефіцієнтів, яка виникає внаслідок наявності похибок вимірювання витрати природного газу.

*Метою роботи* є визначення, за розробленим методом, оптимальної конфігурації вузлів обліку природного газу за вартісним критерієм з урахуванням невизначеності процесу вимірювання.

### Результати дослідження

В роботі [12] сформована і розв'язана задача визначення оптимальних конфігурацій вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрат газу. Задача сформована так. У розпорядженні компанії є  $n$  приладів різних типів для вимірювання витрат газу. Кількість приладів кожного типу —  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , а їхня вартість —  $c_1, c_2, \dots, c_n$ . Кожний з приладів може вимірювати  $a_{1j}, j = \overline{1, n}$  одиниць витрати природного газу. Сумарна пропускна здатність вузла обліку газу повинна бути не менше  $b_1$ . Кожний з  $n$  приладів має деяку похибку вимірювання, що спричиняє в процесі вимірювання необліковані втрати газу  $a_{2j}, j = \overline{1, n}$ . Сумарні необліковані витрати природного газу повинні перевищувати значення  $b_2$ . Задача визначення оптимальних конфігурацій вузлів обліку природного газу формалізована у такий спосіб: необхідно укомплектувати парк вимірювальних приладів так, щоб фінансові затрати на їхнє придбання були б мінімальними за умови забезпечення необхідної пропускної здатності вузла обліку газу не менше, ніж  $b_1$  одиниць витрати газу, а необліковані витрати газу не перевищать величину  $b_2$ , тобто:

$$\min : R(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n c_j x_j ; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \geq b_1 ; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{2j} x_j \leq b_2 ; \quad (3)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n} . \quad (4)$$

Величини  $a_{2j}, j = \overline{1, n}$ , зумовлені похибками вимірювань, будемо трактувати як нечіткі числа.

Введемо позначення

$$y = \sum_{j=1}^n a_{2j} x_j . \quad (5)$$

Для врахування фактора невизначеності над нечіткими величинами необхідно виконати певні арифметичні операції. Процес виконання арифметичних операцій є можливим [13], якщо нечіткі числа  $a_{2j}, j = \overline{1, n}$  визначити як числа  $(L - R)$ -типу.

Нехай  $a_{2j}, j = \overline{1, n}$  нечітка величина  $(L - R)$ -типу. У такому випадку функція належності є комбінацією  $L$  і  $R$  функцій [13]:

$$\mu(a_{2j}) = \begin{cases} L \left( \frac{a_{2j}^{(0)} - a_{2j}}{\alpha_{L,j}} \right), & a_{2j} \geq a_{2j}^{(0)}, \\ R \left( \frac{a_{2j} - a_{2j}^{(0)}}{\alpha_{R,j}} \right), & a_{2j} < a_{2j}^{(0)}, \quad j = \overline{1, n}, \end{cases}$$

де  $\alpha_{L,j}$  і  $\alpha_{R,j}$  — лівий і правий коефіцієнти нечіткості;  $a_{2j}^{(0)}$  — модальне значення нечіткої величини.

Отже, нечіткі числа  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  ( $L-R$ )-типу одно-значно визначені трьома параметрами  $\left\langle a_{2j}^{(0)}, \alpha_{L,j}, \alpha_{R,j} \right\rangle$ .

Кожну нечітку величину  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  будемо характеризувати трикутною функцією належності (рис. 1).

Трикутна функція належності описується [14] таким аналітичним виразом:

$$\mu(a_{2j}) = \begin{cases} \frac{2}{\Delta_{a,j}} (a_{2j} - a_{2j}^{(0)}) + 1, & a_{2j} \in [a_{2j}^{(0)} - \Delta_{a,j}/2; a_{2j}^{(0)}], \\ -\frac{2}{\Delta_{a,j}} (a_{2j} - a_{2j}^{(0)}) + 1, & a_{2j} \in [a_{2j}^{(0)}; a_{2j}^{(0)} + \Delta_{a,j}/2], \quad j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $\Delta_{a,j}$  — інтервал невизначеності нечіткої величини  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Функція належності (6) незручна для практичного використання, оскільки вона недиференційована в деяких точках з області визначення нечіткої величини  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  (рис. 1). Тому функцію належності  $\mu(a_{2j})$  апроксимували [15] гаусовою функцією

$$\mu_G(a_{2j}) = \exp \left( -\frac{(a_{2j} - a_{2j}^{(0)})^2}{2\alpha_j^2} \right), \quad j = \overline{1, n}, \quad (7)$$

де  $\alpha_j^2$  — коефіцієнт концентрації нечіткої величини  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Модальне значення  $a_{2j}^{(0)}$ ,  $j = \overline{1, n}$  не впливає на форму функцій належності (6) і (7), а лише визначає її положення на осі абсцис (рис. 1). Тому апроксимували не функцію належності (6) гаусовою функцією (7), а функцію  $\mu(a_{2j})$ , для якої  $a_{2j}^{(0)} = 0$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Отже, у випадку, коли  $a_{2j}^{(0)} = 0$ , функції належності (6) і (7) трансформуються до такого вигляду:

$$\mu(a_{2j}) = \begin{cases} \frac{2}{\Delta_{a,j}} a_{2j} + 1, & a_{2j} \in [-\Delta_{a,j}/2; 0], \\ -\frac{2}{\Delta_{a,j}} a_{2j} + 1, & a_{2j} \in [0; \Delta_{a,j}/2], \quad j = \overline{1, n} \end{cases} \quad (8)$$

$$i \quad \mu_G(a_{2j}) = \exp \left( -\frac{a_{2j}^2}{2\alpha_j^2} \right). \quad (9)$$

Функції (8) і (9) симетричні відносно осі ординат, тому апроксимацію здійснювали на інтервалі значень  $a_{2j} \in [-\Delta_{a,j}/2; 0]$ . На цьому інтервалі функції належності (8) і (9) монотонні і у разі ап-

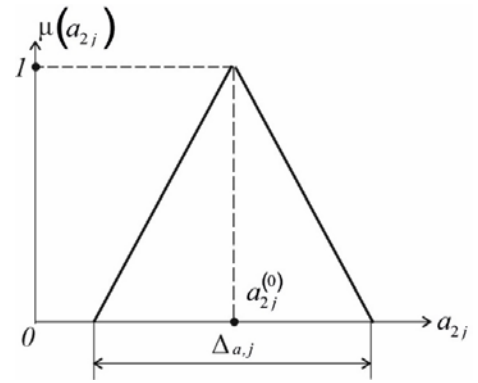


Рис. 1. Трикутна функція належності  $\mu(a_{2j})$

роксимації матимуть не більше двох спільних точок (рис. 2). Перша з них (рис. 1) визначається значенням  $\mu(a_{2o}^{(0)}) = \mu_G(a_{2o}^{(0)}) = 1$ , а друга має місце, коли виконується умова

$$\mu(a_{2o}^{(\theta)}) = \mu_G(a_{2o}^{(\theta)}) = \theta.$$

Враховуючи визначені умови апроксимації, отримали [14]

$$\alpha_j^2 = -\frac{(1-\theta)^2 \Delta_{a,j}^2}{8 \ln \theta}, \quad (10)$$

де  $\theta = 0,5152$ .

Оскільки коефіцієнти  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  лінійного рівняння (5) нечіткі величини, то величина  $y$  також нечітка величина з гаусовою функцією належності [15]

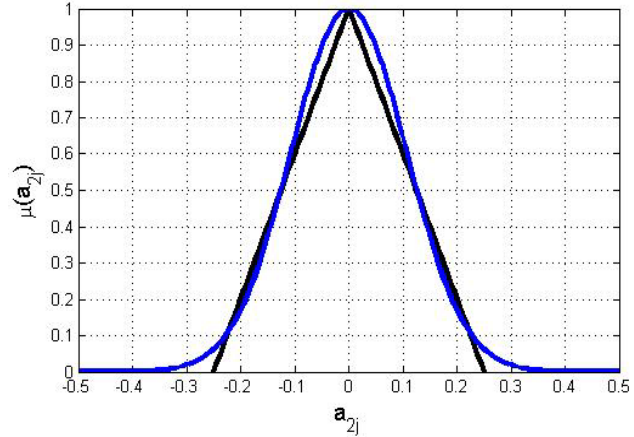


Рис. 2. Трикутна функція належності та її апроксимація гаусовою функцією

$$\mu(y) = \exp\left(-\frac{(y-a_y)^2}{2\alpha_y^2}\right), \quad (11)$$

де  $a_y$  — модальне значення і коефіцієнт конвенції нечіткої величини  $y$ .

Нечіткі величини  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  з гаусовою функцією належності розглядаються як нечіткі числа  $(L-R)$ -типу. Оскільки функція належності  $\mu(a_{2j})$  симетрична відносно модального значення  $a_{2j}^{(0)}$ , то ліві і праві коефіцієнти нечіткості тотожні:  $\alpha_{L,j} = \alpha_{R,j} = \alpha_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Аналіз рівняння (5) показує: для того щоб отримати значення  $a_y$  і  $\alpha_y$  над нечіткими числами  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$   $(L-R)$ -типу необхідно виконати операції множення нечіткого числа на чітке число і додавання нечітких чисел.

Візьмемо два нечітких числа  $a_{2j}$  і  $a_{2(j+1)}$ , які характеризуються двійкою параметрів  $A_{LR} = \langle a_{2j}^{(0)}, \alpha_j \rangle$  і  $B_{LR} = \langle a_{2(j+1)}^{(0)}, \alpha_{(j+1)} \rangle$ . Тоді  $C_{LR} = A_{LR} + B_{LR} = \langle a_{sj}, \alpha_{sj} \rangle$ . Параметри  $a_{sj}$  і  $\alpha_{sj}$  обчислюють [15] за такими формулами:  $a_{sj} = a_{2j}^{(0)} + a_{2(j+1)}^{(0)}$  і  $\alpha_{sj} = \alpha_{2j} + \alpha_{2(j+1)}$ . Тепер нехай нечітке число  $A_{LR} = \langle a_{2j}^{(0)}, \alpha_j \rangle$  помножене на чітку величину  $x_j$ , тобто  $C_{LR} = A_{LR} x_j = \langle a_{pj}, \alpha_{pj} \rangle$ . Тоді  $a_{pj} = a_{2j}^{(0)} x_j$  і  $\alpha_{pj} = \alpha_j x_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ .

Отриманий результат можна розповсюдити на  $n$  доданків  $y = \sum_{j=1}^n a_{2j} x_j$ . Нечітка величина  $y$  буде характеризуватись двійкою параметрів  $y = \langle a_y, \alpha_y \rangle$ . Очевидно, що  $a_y = \sum_{j=1}^n a_{2j}^{(0)} x_j$  і

$$\alpha_y = \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j.$$

Позначимо через  $\gamma$  зріз функції належності (11). Тоді з рівняння  $\exp\left(-\frac{(y-a_y)^2}{2\alpha_y^2}\right) = \gamma$  знаходимо

$$y = a_y + \alpha_y \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}.$$

Після врахування значень  $a_y$  і  $\alpha_y$  дійшли до такого результату:

$$y = \sum_{j=1}^n a_{2j}^{(0)} x_j + \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}} \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j, \quad (12)$$

де коефіцієнти концентрації  $\alpha_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  визначені за формулою (10).

Якщо врахувати формулу (10), то початкова задача оптимізації (1)—(4) трансформувалась у задачу

$$\min : R(\bar{x}) = \sum_{j=1}^n c_j x_j; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \geq b_1; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \left( a_{2j}^{(0)} + \alpha_j \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}} \right) x_j \leq b_2; \quad (15)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (16)$$

у якій враховано нечіткість величин  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , зумовлених похибками вимірювань витрати природного газу.

Зауважимо, що у тому випадку, коли  $a_{2j}$ ,  $j = \overline{1, n}$  вважати чіткою величиною, тоді  $\Delta_{a,j} = 0$ ,  $a_{2j}^{(0)} = a_{2j}$  відповідно  $\alpha_j = 0$  і отримаємо чітку задачу оптимізації (1)—(4).

Задачу (14)—(16) про вибір оптимальної конфігурації вузлів обліку, розв'яжемо на прикладі однієї з газорозподільних станцій. Необхідні дані для розрахунку взяті з роботи [12] і розміщені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку

№	DN	Тип приладу	Вартість приладу, відносні одиниці	Максимальна пропускна здатність, м <sup>3</sup> /год.	Інтервал невизначеності, $\delta_{mj} \cdot 10^{-2}$ в. о.	Модальне значення, $\delta_{mj} \cdot 10^{-2}$ в. о.
1	80	УЛГ	1,00	400	1,0	0,5
2	80	ТЛГ	0,20	400	2,0	1,0
3	80	ДКС	0,15	450	3,0	1,5
4	100	УЛГ	1,00	650	1,0	0,5
5	100	ТЛГ	0,24	650	2,0	1,0
6	100	ДКС	0,17	680	3,0	1,5
7	150	УЛГ	1,00	1600	1,0	0,5
8	150	ТЛГ	0,32	1600	2,0	1,0
9	150	ДКС	0,23	1530	3,0	1,5
10	200	УЛГ	1,00	2500	1,0	0,5
11	200	ТЛГ	0,32	2500	2,0	1,0
12	200	ДКС	0,31	2730	3,0	1,5
13	300	УЛГ	1,00	6500	1,0	0,5
14	300	ТЛГ	0,29	6500	2,0	1,0
15	300	ДКС	0,33	6150	3,0	1,5

*Примітки:* УЛГ — ультразвуковий лічильник газу; ТЛГ — турбінний лічильник газу; ДКС — витратомір змінного перепаду тиску; DN — умовний діаметр трубопроводу.

Інтервали невизначеності  $\Delta_{a,j}$  і модальні значення  $a_{2j}^{(0)}$  обчислені за такими формулами (табл. 1):

$$\Delta_{a,j} = \delta_{mj} a_{1j} \text{ і } a_{2j}^{(0)} = \delta_{mj} a_{1j}.$$

Оскільки  $\alpha_j$  обчислюється за формулою (10), то

$$\alpha_j \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}} = A_\gamma \Delta_{a,j}, \quad j = \overline{1, n},$$

$$\text{де } A_\gamma = \frac{1}{2}(1-\theta) \sqrt{\ln \gamma / \ln \theta}.$$

Монтаж вимірювальних пристроїв здійснюється на трубопроводах різного умовного діаметра DN (табл. 1). Тому задачу оптимізації (14)—(16) необхідно розв'язувати окремо для кожного умовного діаметра DN.

На рис. 3 показані три можливі варіанти [12] компоновки вузлів обліку витрати природного газу для вибраного DN.

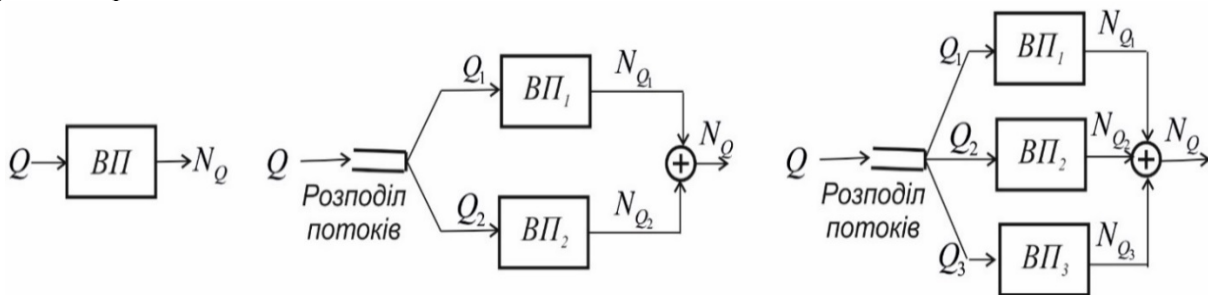


Рис. 3. Варіанти з'єднання вимірювальних пристроїв у складі вузлів обліку природного газу

У тому випадку, коли сумарна пропускна здатність  $b_1$  вузла обліку природного газу не забезпечується одним приладом, можлива паралельна робота двох або трьох вимірювальних пристроїв (рис. 3). Тоді сумарна пропускна здатність буде такою: у випадку роботи двох паралельних приладів —  $N_Q = N_{Q1} + N_{Q2}$ , для трьох паралельних приладів —  $N_Q = N_{Q1} + N_{Q2} + N_{Q3}$ , де  $N_{Qi} = k_i Q_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $k_i$  — коефіцієнт пропорційності.

Задача (14)—(16), в якій  $x_j$  — кількість приладів відповідного типу для вимірювання витрати природного газу, є задачею цілочислового програмування.

Якщо в умові (15) увести позначення

$$a_{2j} = a_{2j}^{(0)} + \alpha_j \sqrt{\ln \frac{1}{\gamma^2}}, \quad (17)$$

то задача (13)—(16) за структурою збігається з задачею (1)—(4).

Задачу (14)—(16) можна розв'язати за допомогою двох методів [16]: методу відтинання (методу Гоморі) і методу меж і гілок. Як в першому, так і в другому методі початкова задача певним чином трансформується в послідовність задач, у яких вимога цілочисельності знімається.

Програма, створена в середовищі MatLab, працює в інтерактивному режимі. Після введення значення умовного діаметра DN, необхідно увести сумарну пропускну здатність  $b_1$  та значення  $b_2$  необлікованих втрат природного газу. Значимо, що значення  $b_2$  повинно задовольняти умову (15). Якщо умова (15) не виконується на екрані дисплея комп'ютера з'являється таке повідомлення:

**«No feasible solution found (жодного рішення не знайдено)».**

Задачу (14)—(16) розв'яжемо для випадків, коли DN = 80 і DN = 300. Необхідні початкові дані взяті з табл. 1. Значення величини зрізу  $\gamma = 0,7$ .

Процедури введення початкових даних і результати обчислень подано на List 1 і List 2.

«Введіть вибране значення умовного діаметра: 80,100,150,200, 300»  
 DN=80  
 «Введіть значення сумарної пропускної здатності ВОГ»  
 b1=300  
 «Введіть значення необлікованих витрат газу»  
 b2=7  
 «ВИБРАНІ ТИПИ ЛІЧИЛЬНИКІВ»  
 «ТЛГ-турбінний лічильник»  
 «Кількість лічильників k=1»  
 «Оптимальна сумарна вартість приладів, відносні одиниці»  
 «C= 0.2009»  
 «Необліковані витрати газу, куб.м/год»  
 «B2=4.8800»

List 1. Процедура введення даних і результати розрахунку при DN=80

«Введіть вибране значення умовного діаметра: 80,100,150,200, 300»  
 DN=300  
 «Введіть значення сумарної пропускної здатності ВОГ»  
 «b1=9500»  
 «Введіть значення необлікованих витрат газу»  
 «b2=100»

«ВИБРАНІ ТИПИ ЛІЧИЛЬНИКІВ»  
 «УЛГ-ультразвуковий лічильник»  
 «Кількість лічильників k=2»  
 «Оптимальна сумарна вартість приладів, відносні одиниці»  
 «C=2.0000»  
 «Необліковані витрати газу, куб.м/год»  
 «B2=79.3004»

List 2. Процедура введення даних і результати розрахунку при DN=300

У табл. 2 зведені порівняльні результати розв'язування задач (1)—(4) і (13)—(16).

Таблиця 2

Результати розв'язування задач (1)—(4) і (13)—(16)

Задача	Тип лічильника	Кількість	Оптимальна вартість, в. о.	Необліковані витрати, м <sup>3</sup> /год
Умовний діаметр DN = 80				
(1)—(4)	ДКС	1	0,452	6,75
(13)—(16)	ТЛГ	1	0,209	4,88
Умовний діаметр DN = 300				
(1)—(4)	УЛГ	1	1,2947	97,5
	ТЛГ	1		
(13)—(16)	УПГ	2	2,0	79,3

Аналіз табл. 2 показує, що врахування у постановці задачі визначення оптимальних конфігурацій вузлів обліку природного газу нечіткості параметрів в умові (3) помітно впливає на розв'язок задачі (13)—(16) у порівнянні з задачею (1)—(4).

### Висновки

1. Врахування похибок вимірювання в оптимізаційні задачі визначення конфігурацій вузлів обліку та пунктів вимірювання витрат газу здійснено шляхом трактування похибок як нечітких величин з трикутною функцією належності, яка апроксимована гаусовою функцією, що дало змогу виразити коефіцієнти обмежень через параметри трикутної функції належності.

2. Встановлено, що задача визначення оптимальних конфігурацій пунктів вимірювання та обліку газу у детермінованій постановці з врахуванням похибок вимірювань перетворюється в задачу

цілочислового програмування, в якій коефіцієнти обмеження, зумовленого необлікованими витратами, функціонально зв'язані з похибками вимірювань природного газу.

3. Ефективність розробленого програмного забезпечення оптимізаційної задачі перевірено на конкретному прикладі вибору оптимальної конфігурації вузла обліку за критерієм мінімальних фінансових затрат на оснащення вузла обліку пристроями обліку природного газу для однієї з газорозподільних станцій. Здійснено порівняльний аналіз двох варіантів оптимізаційної задачі: у детермінованій постановці і з урахуванням нечіткості коефіцієнтів, викликаних похибками вимірювань, в обмеженні, зумовленому необлікованими втратами. Встановлено, що в другому варіанті на розв'язок оптимізаційної задачі помітний вплив мають нечіткі параметри.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. П. Пістун, і Л. В. Лесовой, *Нормування витратомірів змінного перепаду тиску*. Львів, Україна: вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006, 576 с.
- [2] С. Пістун, та ін., «Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання.» *Метрологія та прилади*, № 4, с. 13-23, 2014.
- [3] Й. Й. Білинський, М. О. Стасюк., і М. В. Гладишевський, «Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ і класифікація на їх основі.» *Наукові праці ВНТУ*, № 1, 2015.
- [4] М. П. Андрійшин, *Вимірювання витрати та кількості газу*, довідник, Івано-Франківськ, Україна: ПП «Сімик», 2004, 160 с.
- [5] Я. М. Власюк, І. С. Кисіль, і О. Є. Середюк, «Реалізація концепції створення єдиної системи обліку природного газу в Україні.» *Методи та прилади контролю якості*, № 13, с. 61-65, 2005.
- [6] О. Є. Середюк, і Т. В. Лютенко, «Експериментальні дослідження вузлів обліку природного газу різних принципів дії.» *Метрологія та прилади*, 2015.
- [7] Michael Reader-Harris, “Orifice Design. Orifice Plates and Venturi Tubes,” *Springer*, Cham, p. 33-76, 2015.
- [8] Shan Feng, Liu Zhichun, Liu Wei, and Tsuji Yoshiyuki. “Effects of the orifice to pipe diameter ratio on orifice flows,” *Chem Eng Sci*, no. 152, pp. 497-506, 2016.
- [9] F. Cascetta, and G. Rotondo, “Effects of Intermittent Flows on Turbine Gas Meters Accuracy,” *Second University of Naples, Italy Measurement*, no. 69, pp. 280-286, 2015.
- [10] B. M. Menezes and B. D. Manager, “Calculating & Optimizing Repeatability of Natural Gas Flow Measurements,” *Tech. Note*, no. November, 2012.
- [11] J. Savickis1, L. Zemite, I. Bode, and L. Jansons, “Natural gas metering and its accuracy in the smart gas supply systems,” *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, no. 5, 2020.
- [12] М. І. Горбійчук, і О. А. Скріпка, «Метод визначення оптимальних конфігурацій вузлів обліку газу та пунктів вимірювання витрат газу.» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 13-18, 2024. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-13-18>.
- [13] Л. Г. Раскін, О. В. Серая, і В. Ю. Воловщиков, *Нечітка математика*, підручн. Харків, Україна: НТУ «ХПИ», 2016, 203 с.
- [14] M. Horbichuk, N. Lazoriv, and L. Feshanych, “Determining the effect of fuzziness in the parameters of a linear dynamic system on its stability,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Mathematic and cybernetics – applied aspects*, no. 2/4 (110), pp. 15-21, 2021.
- [15] Mikhail I Gorbichuk., and Taras V. Humenyuk, “Synthesis Method of Empirical Models Optimal by Complexity under Uncertainty Conditions,” *Journal of Automation and Information Sciences*, vol. 48, issue 9, pp. 64-74, 2016.
- [16] М. І. Горбійчук, *Математичні методи оптимізації*, навч. посіб. Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2018, 302 с.

Рекомендована кафедрою автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025

**Горбійчук Михайло Іванович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: mi\_profgorb@ukr.net ;

**Скріпка Олександр Анатолійович** — канд. техн. наук, докторант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, e-mail: skripkaoleksandr2020@gmail.com .

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ



M. I. Gorbiychuk<sup>1</sup>  
O. A. Skripka<sup>1</sup>

## Method for Determining Optimal Configurations of Gas Metering Nodes and Gas Flow Measurement Points under Conditions of Uncertainty

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

*The authors propose a new method for determining the configuration of natural gas metering nodes and gas flow measurement points, which takes into account, in addition to traditional approaches to the solution of this problem based on data on the technical and metrological characteristics of measuring instruments, also the criterion of the total cost of measuring devices under conditions of uncertainty.*

*The measuring devices considered in the article are variable pressure differential flow meters, turbine gas meters, and ultrasonic flow meters, which are most often used in the construction, repair, or reconstruction of gas metering units and gas flow measurement points. The problem of selecting the optimal configuration of a natural gas metering unit is formulated, provided that the parameters in the optimization problem, which are caused by measurement errors, are treated as fuzzy numbers of the (L-R)-type. It is shown that the initial problem is transformed into an integer programming problem in which the constraint coefficients determining the unaccounted losses depend on the parameters of the triangular membership function, which is approximated by a Gaussian function. The problem of determining the optimal number of measuring devices for natural gas metering units or gas flow measurement points, which is formulated in this work, is solved using software in the MatLab environment. The effectiveness of the developed optimization problem software was tested on a specific example of choosing the optimal configuration of the metering node based on the criterion of minimal financial costs for equipping the metering node with natural gas metering devices for one of the gas distribution stations. A comparative analysis of two variants of the optimization problem was carried out: in a deterministic formulation and taking into account the fuzziness of the coefficients, which are caused by the measurement errors, within the limitation caused by unaccounted losses*

*To verify the operation of the proposed method and the developed software, the initial data was used, which takes into account the real operating conditions of gas metering units and gas flow measurement points. The use of the proposed method will reduce the costs of construction, repair or reconstruction of gas metering units and gas flow measurement points.*

**Keywords:** natural gas, gas metering, measuring device, measurement errors, fuzzy parameters.

**Gorbiychuk Mykhailo I.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Automation and Computer-Integrated Technologies, e-mail: mi\_profgorb@ukr.net ;

**Skripka Oleksandr A.** — Cand. Sc. (Eng.), Doctoral Student of the Chair of Automation and Computer-Integrated Technologies, e-mail: skripkaoleksandr2020@gmail.com