

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121

ВИЗНАЧЕННЯ ТОПОЛОГІЙ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ХОРД УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ РІДИНИ

І.А. Гришанова, І.В. Коробко, П.М. Погребний*

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
м. Київ, просп. Перемоги, 37, 03056, i.korobko@kpi.ua*

Проведені результати дослідження топологій вимірювальних хорд ультразвукових перетворювачів витрати рідини в потоках з викривленими профілями на базі використання методів обчислювальної гідродинаміки. Для оцінки запропонованих топологій хорд моделювання проводилось в умовах впливу місцевого опору - двох 90° колін, розташованих в перпендикулярних площинах. В якості досліджуваних метрологічних характеристик витратомірів з різною конфігурацією хорд задіяні похибки від асиметрії профілю швидкостей, які є функцією кутової просторової орієнтації приладу відносно профілю потоку, і від ступеню його неоднорідності. Отримані висновки можуть слугувати корисними рекомендаціями для різних умов експлуатації ультразвукових витратомірів і сприяти значному зменшенню їхньої похибки за рахунок вибору кількості хорд і їхнього правильного розташування.

Ключові слова: рідина, витрата, ультразвукові перетворювачі, точність, топологія вимірювальних хорд, асиметрія потоку.

Приведены результаты исследования топологий измерительных хорд ультразвуковых преобразователей расхода жидкости в потоках с искаженными профилями на базе использования методов вычислительной гидродинамики. Для оценки предложенных топологий хорд моделирование проводилось в условиях воздействия местного сопротивления - двух 90° колен, расположенных в перпендикулярных плоскостях. В качестве исследуемых метрологических характеристик расходомеров с разной конфигурацией хорд задействованы погрешности от асимметрии профиля скоростей, которые являются функцией угловой пространственной ориентации прибора относительно профиля потока, и от степени его неоднородности. Полученные выводы могут служить полезными рекомендациями для разных условий эксплуатации ультразвуковых расходомеров и способствовать значительному уменьшению их погрешности за счет выбора количества хорд и их правильного расположения.

Ключевые слова: жидкость, расход, ультразвуковые преобразователи, точность, топология измерительных хорд, асимметрия потока.

In this study CFD investigation of paths topology for ultrasonic flow meters under distorted flow profiles is proposed. The set of discovered topologies was created and simulated under velocity profile after two 90° bends in perpendicular planes. In order to evaluate the performance of the multipath ultrasonic flow meters with different chord configurations the measurement error caused by flow asymmetry and error caused by flow deviation from classic turbulent form are determined. Obtained conclusions can be applied to specific service conditions and a significant reduction in error of ultrasonic flow meters can be achieved due to number of chords and their correct arrangement.

Keywords: fluid, flow rate, ultrasonic flow transducer, accuracy, chords topology, flow asymmetry.

Вступ. Сьогодні в світі існує тенденція, коли ультразвукова витратометрія задає планку, на яку рівняються усі інші технології вимірювання витрати. Ультразвукові витратоміри, маючи високу

Точність і багато конструктивних переваг перед іншими витратомірами, набули широкого застосування для визначення об'єму та об'ємної витрати рідин і газів, які транспортуються по технологічних мережах і споживаються

окремими об'єктами. Це обумовлено перш за все посиленням вимог до точності обліку енергетичних ресурсів, яку можуть забезпечити далеко не всі представники парку витратомірної техніки. Енергетичні ресурси дорожчають внаслідок виснаження їх запасів і трудомісткості видобутку, а значить, необхідно приділяти особливу увагу їх правильному обліку. Саме тому проблема розробки нових і подальшого вдосконалення існуючих ультразвукових приладів вимірювання витрати і кількості енергетичних носіїв залишається дуже актуальною.

Постановка задачі. Важливим напрямом оптимізації ультразвукових перетворювачів витрати, направлених на створення приладу з високими метрологічними характеристиками, є визначення раціональних топологій вимірювальних хорд та їх кількості. Задля цього необхідно виконати наступні кроки:

- створити математичну модель багатохордового ультразвукового витратоміра, що враховуватиме різну кількість хорд і різне їх розташування по перерізу витратомірної ділянки, кутову просторову орієнтацію вимірювального перетворювача витрати;

- визначити вплив різних місцевих опорів в технологічних мережах та викликану ними неоднорідність потоку на метрологічні характеристики ультразвукових витратомірів;

- розробити методологію оцінки оптимальної топології хорд для певного випадку викривленого профілю потоку в технологічних мережах.

Вибір топологій хорд для дослідження. Аналіз застосування ультразвукових перетворювачів для вимірювання витрати та кількості рідиннофазного середовища вказує на те, що найбільш доцільно в таких приладах застосовувати багатохордову схему визначення швидкості потоку з різною просторовою орієнтацією акустичних каналів зондування потоку в його поперечних перерізах [1-3].

При проведенні досліджень введемо такі позначення: $T_i j$ – i -та топологія ($i = \overline{1, n_i}$) з j -тою кількістю хорд в ній; $P_{k_{co}s}$ – профіль швидкості в k -му місцевому гідравлічному опорі ($k_{co} = \overline{1, n_k}$) з s -м номером поперечного перерізу по протяжності вимірювального каналу ($s = \overline{1, n_s}$). Виходячи з реальних умов

вимірювання та можливих варіацій схем вимірювання, зафіксуємо величини рядів: $n_i = 3$, $n_j = 5$, $n_s = 3$.

Розглянемо всі випадки для кожної кількості хорд j в топології.

1. При кількості вимірювальних хорд $j = 1$:

$i=1$ (схема 1С) (рис. 1): параметри розташування хорд $h = 0, \varphi = 0^\circ$.

2. При кількості вимірювальних хорд $j = 2$:

$i=1$ (схема 2Н) (рис. 2): параметри розташування хорд $h_k = 0,5R; \varphi_k = \pi k; k = \overline{1, 2}$

$i=2$ (схема 2С) (рис. 3): $h_k = 0; \varphi_k = \frac{\pi}{2} k;$

$k = \overline{1, 2}$.

3. При кількості вимірювальних хорд $j = 3$:

$i=1$ (схема 3S) (рис. 4): параметри розташування хорд $h_k = 0,5R; \varphi_k = \frac{2}{3} \pi k;$

$k = \overline{1, 3}$.

$i=2$ (схема 3С) (рис. 5): $h_k = 0; \varphi_k = \frac{1}{3} \pi k;$

$k = \overline{1, 3}$.

$i=3$ (схема 3Н) (рис. 6): $h_1 = 0,5R; h_2 = 0R;$

$h_3 = -0,5; \varphi_k = 0\pi k, k = \overline{1, 3}$.

4. При кількості вимірювальних хорд $j = 4$:

$i=1$ (схема 4S) (рис. 7): параметри розташування хорд $h_k = 0,5R; \varphi_k = \frac{1}{2} \pi k;$

$k = \overline{1, 4}$.

$i=2$ (схема 4С) (рис. 8): $h_k = 0; \varphi_k = \frac{1}{4} \pi k;$

$k = \overline{1, 4}$.

$i=3$ (схема 4Н) (рис. 9): $h_1 = 0,5R; h_2 = 0,2R;$

$h_3 = -0,2R; h_4 = -0,5R; \varphi_k = 0\pi k; k = \overline{1, 4}$.

5. При кількості вимірювальних хорд $j = 5$:

$i=1$ (схема 5S) (рис. 10): параметри розташування хорд $h_k = 0,5R; \varphi_k = \frac{18}{45} \pi k;$

$k = \overline{1, 5}$, де k - номер хорди.

$i=2$ (схема 5С) (рис. 11): $h_k = 0; \varphi_k = \frac{9}{45} \pi k;$

$k = \overline{1, 5}$.

$i=3$ (схема 5Н) (рис. 12): $h_1 = 0,5R;$

$h_2 = 0,3R; h_3 = 0; h_4 = -0,3R; h_5 = -0,5R;$
 $\varphi_k = 0\pi k; k = \overline{1, 5}$.

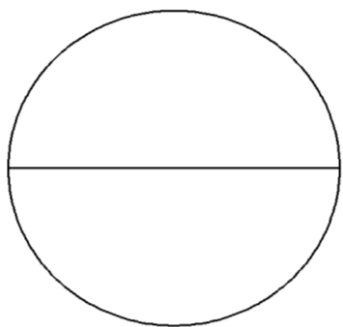


Рисунок 1 - Схема 1С

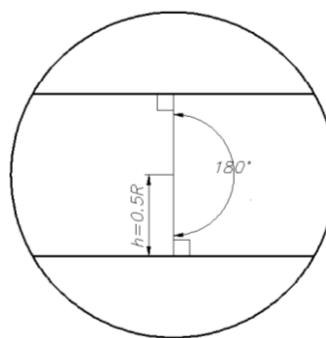


Рисунок 2 - Схема 2Н

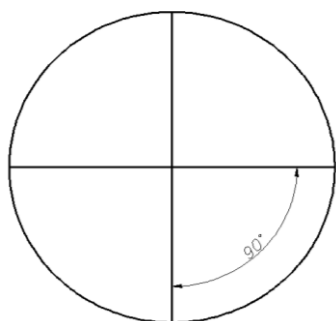


Рисунок 3 - Схема 2С

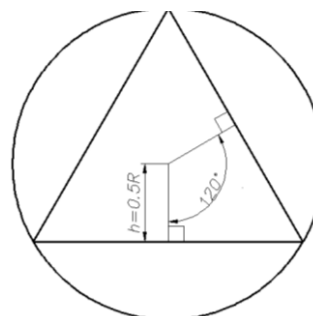


Рисунок 4 - Схема 3S

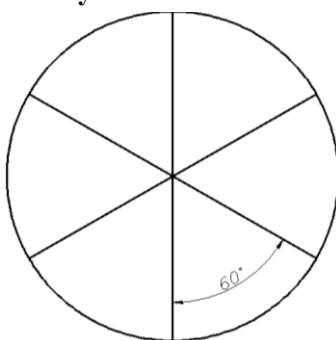


Рисунок 5 - Схема 3С

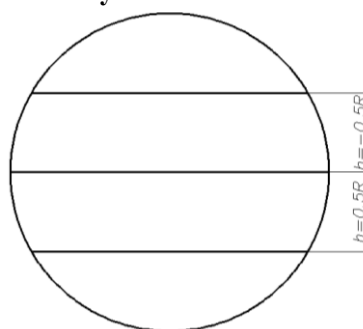


Рисунок 6 - Схема 3Н

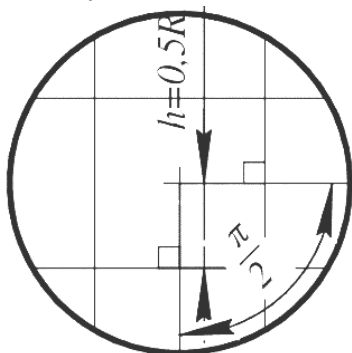


Рисунок 7 - Схема 4S

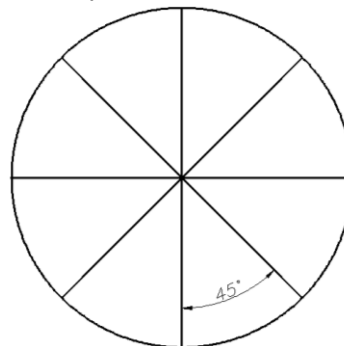


Рисунок 8 - Схема 4С

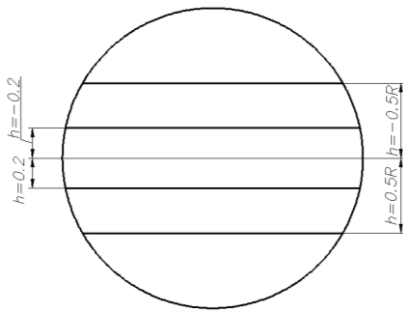


Рисунок 9 - Схема 4Н

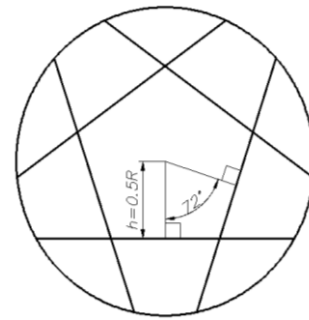


Рисунок 10 - Схема 5S

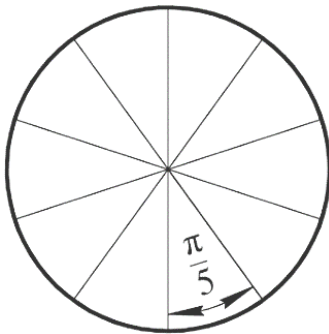


Рисунок 11 - Схема 5С

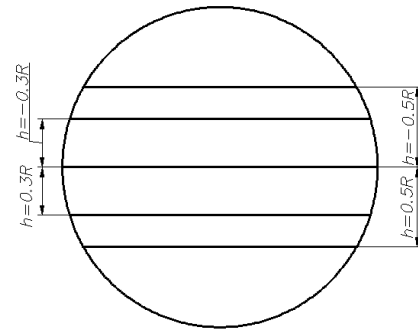


Рисунок 12 - Схема 5Н

На точність реєстрації УЗ приладами об'єму та об'ємної витрати особливий вплив мають гідродинамічні характеристики потоку, які характеризують неоднорідність розподілу швидкості у поперечних перерізах вимірювальної камери і генеруються місцевими гідравлічними опорами, які є невід'ємною частиною будь-якої реальної системи обліку. До таких гідравлічних опорів належать конфузори, дифузори, раптові розширення та звуження; коліна різної геометричної форми та просторової орієнтації.

Дослідження запропонованих топологій вимірювальних хорд УЗ ультразвукових перетворювачів проведені при впливі неоднорідностей потоку модульованих різними місцевими опорами. В реальних вузлах обліку найбільш значні асиметрії потоку створюються при його проходженні гідравлічних опорів у формі двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожний і розміщених в різних площинах (рис.13).

Враховуючи складність та трудомісткість процесів натурних експериментів дослідження проводилися із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки на базі програмного комплексу ANSYS CFX, що реалізує метод кінцевих елементів і дозволяє з

високою ймовірністю визначити проєкції векторів швидкостей та тиску в дискретних точках потоку, як за поперечним перерізом, так і по його протяжності [4,5].

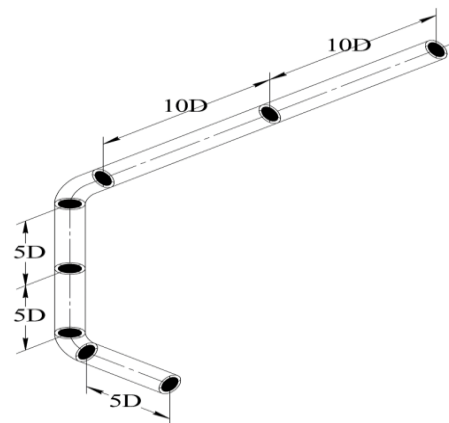


Рисунок 13 - Два коліна з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожний і розміщених в різних площинах: D - внутрішній діаметр трубопроводу

Найбільш часто використовуються УЗ прилади, які визначають швидкість потоку за виміром різниці часу проходження акустичного

сигналу в напрямі руху потоку і проти нього.

Аналіз роботи УЗ приладів показує, що значення вимірної витрати пропорційне усередненій за УЗ променем швидкості потоку \bar{v}_h , площі поперечного перерізу вимірювальної ділянки S та гідродинамічному коефіцієнту k_{zd} , що показує співвідношення між усередненою за УЗ променем швидкістю потоку \bar{v}_h , яку вимірює прилад, та середньою по поперечному перерізу трубопроводу швидкістю потоку \bar{v}_s [4].

Визначення витрати рідиннофазного середовища УЗ ВПВ здійснюється за швидкістю потоку на вимірювальній ділянці, яку за різної кількості хорд можна представити виразом [1]

$$\bar{v}_s(\varphi_x, Re) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{zd}(h_i, Re) \cdot \bar{v}_h(h_i, Re), \quad (1)$$

де n -кількість хорд; h_i - відстань хорди від центру витратомірної ділянки; φ_x - кут просторової орієнтації вимірювального перетворювача відносно вісі потоку; Re - число Рейнольдса.

Оцінювання похибки перетворювача по всім схемам розміщення вимірювальних хорд здійснювалося за визначеної просторової орієнтації приладу (постійного значення φ_x) і зміні числа Re ($\delta(Re)$) та за різної орієнтації приладу відносно вісі течії ($\delta(\varphi_x)$).

Враховуючи сталість значення поперечного перерізу вимірювальної ділянки S , оцінку точності УЗ перетворювача можна проводити шляхом знаходження відхилення гідродинамічного коефіцієнта за реальної неоднорідності відносно його значення для модельного осесиметричного профілю що описує розвинутий турбулентний потік у трубопроводі.

$$\delta(Re) = \frac{\bar{v}_s(Re)_x}{\bar{v}_{ex}} \Big|_{\varphi_x=const},$$

$$\delta(\varphi) = \frac{\bar{v}_s(\varphi)_x}{\bar{v}_{ex}} \Big|_{Re=const}, \quad (2)$$

де \bar{v}_{ex} середня швидкість потоку на вході трубопроводу.

При оцінюванні перетворювачів за виразом (2) можна конфігурація оберталася навколо своєї вісі симетрії на кут π рад з кроком 2° , по відношенню до профілю потоку вимірюваного середовища. В результаті отримані залежності гідродинамічного коефіцієнту від просторової

кутової орієнтації приладу.

Гідродинамічний коефіцієнт $k_{zd}(h, Re)$ у виразі (1), що визначається теоретично, замінимо значеннями, отриманими для $h = 0R, 0.1R, \dots, 0.9R$ при моделюванні потоку в трубопроводі з такими ж параметрами, де характер течії набуває розвинутої турбулентності (табл.1)

$$\bar{v}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{zd-мод}(h_i) \cdot \bar{v}_h(h_i). \quad (3)$$

При дослідженнях впливу неоднорідностей потоку вимірюваного середовища, викликаних місцевими опорами різної конфігурації, на точність УЗ з різною топологією хорд, похибку від асиметрії профілю швидкості доцільно розділити на дві складові: залежну від кутової просторової орієнтації приладу відносно профілю потоку D_{yz} та від ступеня неоднорідності потоку E_{yz} . Похибка D_{yz} існує при локальних гідравлічних опорах, які викликають викривлення потоку відносно вісі (коліна з різною просторовою конфігурацією) і є функцією вісесиметричності потоку. Похибка E_{uz} викликана відхиленням форми потоку в досліджуваному перерізі від вхідного з розвинутою турбулентністю і є наслідком сильного підвищення його турбулентності, що наближує профіль швидкостей до нормального, а іноді, навіть, до випуклого всередину або ж навпаки, до утворення вихорів в приміжовому шарі (після дифузора), що робить форму потоку занадто витягнутою. При цьому гідравлічний коефіцієнт для хорди довільної локальної просторової орієнтації може набути значення, як більше, так і менше зразкового (теоретичного).

Таблиця 1 – Значення $k_{zd-мод}(h)$

h/R	0	0,1	0,2	0,3	0,4
$k_{zd-мод}(h)$	0,9722	0,9726	0,9746	0,9795	0,9867
h/R	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$k_{zd-мод}(h)$	1,0001	1,0277	1,0718	1,1302	1,2814

Для досліджень впливу неоднорідності потоку вимірюваного середовища рідини, модульованого гідравлічними опорами, на похибки УЗ перетворювачів витрати з розглядуваною топологією вимірювальних хорд обрані локальні опори з різною просторовою конфігурацією.

Розподіл швидкостей по протяжності технологічної мережі після локального гідравлічного опору просторової форми у

вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне і розміщених в різних площинах наведені на рис.14.

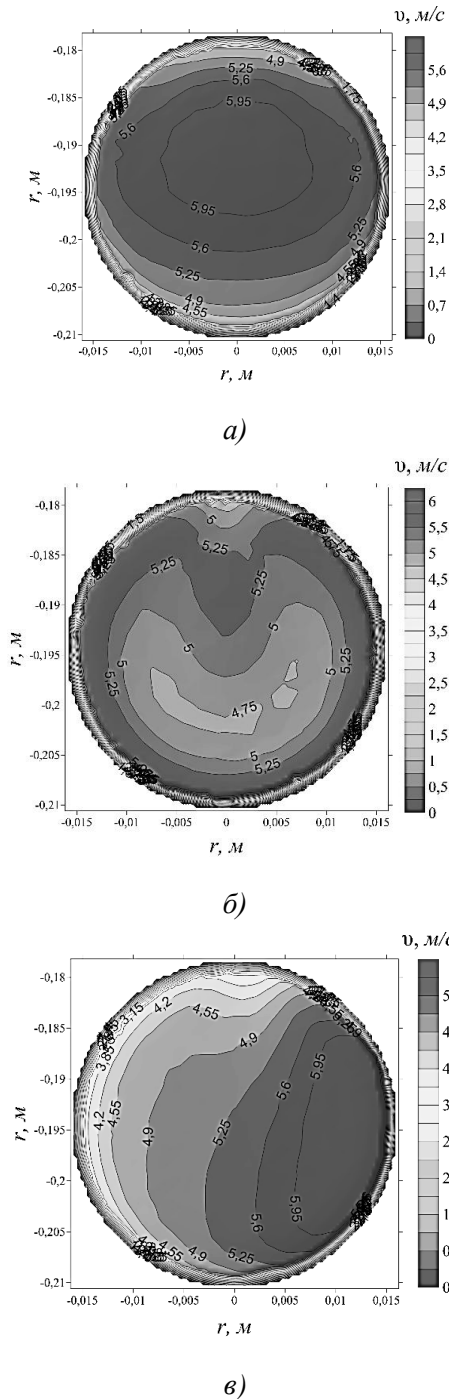


Рисунок 14 - Профілі швидкостей в перерізі на відстані: а)- $5d_y$; б)- $10d_y$; в)- $20d_y$ після місцевого опору – два коліна з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне розміщених в різних площинах

Результати визначення ступеню впливу неоднорідності потоку на точність перетворювача, викликаного гідравлічним опором у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне, розміщених в різних площинах за різних топологій вимірювальних хорд, в перерізах на відстані: $5d_y$ (рис.15.), $10d_y$ (рис. 16) та $20d_y$ (рис. 17) окреслюють, що при розміщенні хорд за схемою С найкращим чином мінімізується похибка D_{yz} , а при топологіях 4С-2С маємо мінімальне значення похибки по протяжності вимірювальної магістралі в діапазоні $5d_y - 20d_y$. Проте, для похибки E_{yz} відповідне розташування дає не найкращий результат, так її значення сильно змінюється в діапазоні на відріжку $5d_y - 20d_y$ від $-0,5\%$ до $+1,4\%$.

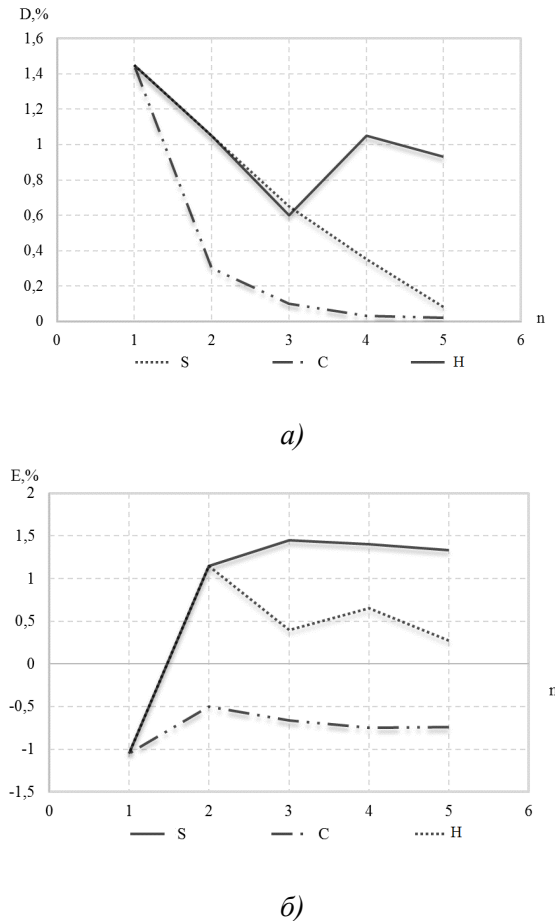
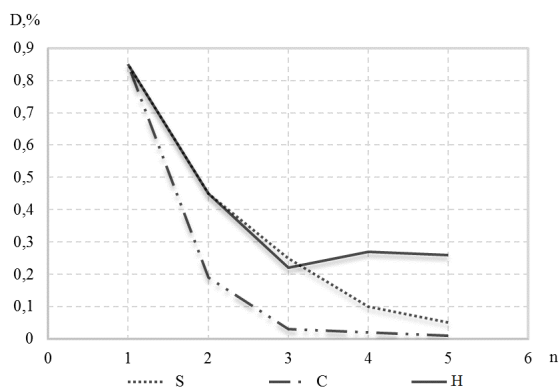


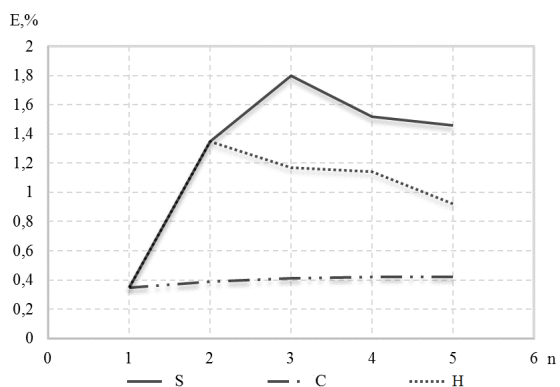
Рисунок 15 - Похибки викликані гідравлічним опором у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне, розміщених в різних площинах для $5d_y$ після нього:

а)- $D_{yz} = f(n)$; б)- $E_{yz} = f(n)$

Розташування хорд за схемою S при $4S-2S$ мінімізує величину похибки D_{yz} гірше, ніж схема C , але при подальшому збільшенні кількості вимірювальних хорд, наближається за точністю до топології C . При такому розміщенні вимірювальних хорд на похибку E_{yz} зміни симетричності потоку мають не дуже суттєвий вплив. На ділянці вимірювального каналу $5d_y - 20d_y$ похибка E_{yz} змінюється від 1,1% до +1,8%, що значно менше, ніж при використанні топології за схемами C .



а)



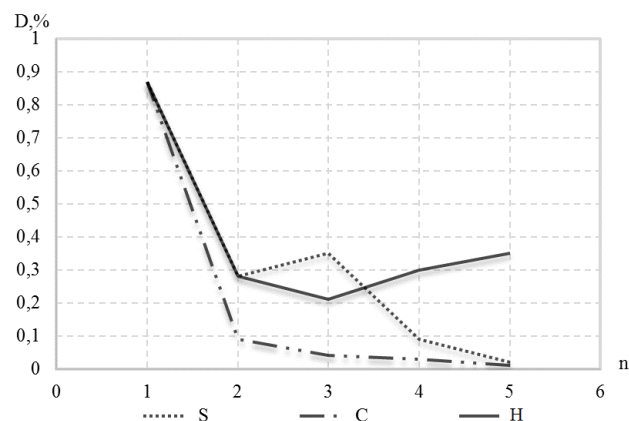
б)

Рисунок 16 - Похибки викликані гідравлічним опором у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне, розміщених в різних площинах для $10d_y$ після нього:

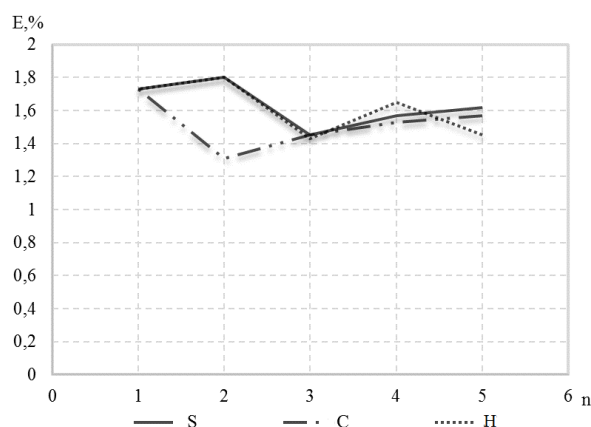
$$a) - D_{yz} = f(n); \quad б) - E_{yz} = f(n)$$

Схема розташування хорд H дає неоднозначний результат, вона найгіршим чином мінімізує похибку D_{yz} . Але у випадку мінімізації похибки E_{yz} протягом $5d_y - 20d_y$ похибка змінюється від 0,3% до +1,8%, що краще, ніж при використанні топології C , але

гірше ніж при схемі S .



а)



б)

Рисунок 17 - Похибки викликані гідравлічним опором у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне, розміщених в різних площинах для $20d_y$ після нього:

$$a) - D_{yz} = f(n); \quad б) - E_{yz} = f(n)$$

З отриманих результатів загалом, найкращою альтернативою є топологічна схема орієнтації вимірювальних хорд S , але в часткових випадках (при різних кількостях хорд) може поступатись іншим схемам.

Загалом похибки D_{yz} зменшуються для будь-якої схеми розташування при збільшенні кількості хорд від $\pm 1,5\%$ до $\pm 0,1\%$, але таке збільшення хорд не зменшує похибку D_{yz} , яка часто більша за похибку E_{yz} і потребує обов'язкової корекції. Така корекція може бути здійснена за методом прогнозування форми потоку рідини технологічної мережі.

Топологічні схеми розташування хорд S та C

дають високі результати при прогнозуванні форми потоку, якщо він не є симетричним відносно вісі. В протилежному випадку їх використання не принесе бажаних результатів. При цьому схема розташування хорд H , може використовуватися при прогнозуванні форми симетричного потоку, але слабо відчуває несиметричність потоку відносно осі. Тому для прогнозування форми потоку з подальшою інтелектуальною корекцією показань витратоміра необхідно використовувати гібридні схеми розташування хорд.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень розроблена методологія та алгоритми оптимізації ультразвукових перетворювачів шляхом визначення раціональних топологій вимірюваних площин (хорд). Сформовано набір дослідних топологій, які тестовані при дії на вимірюване середовище різноманітних гідравлічних опорів, що мають місце в технологічних мережах, та визначені похибки від асиметрії профілю швидкості, змодульованої місцевим гідравлічним опором просторової геометричної форми у вигляді двох колін з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожне і розміщених в різних площинах, у вигляді двох складових: які є функцією кутової просторової орієнтації приладу відносно профілю потоку та ступеню його неоднорідності.

1. Gryshanova, I. *Investigation Of Optimal Chord Topology For Multipath Ultrasonic Flow Meters In Distorted Flows [Text]* / I. Gryshanova, P. Pogrebniy, A. Rak// *Proceeding of 16th International Flow Measurement Conference FLOMEKO 2013.* – 2013. 2. Филатов, В. И. *Гидродинамические погрешности ультразвуковых расходомеров [Текст]* / В. И. Филатов // *Измерительная техника.* – 1996. – №9. – С. 36 – 37. 3. Pamela I Moore, *Ultrasonic transit-time flowmeters modelled with theoretical velocity profiles: methodology [Text]* / Gregor J Brown and Brian P Stimpson // *Meas. Sci. Technol.* – 2000. - Vol. 11. - Pp. 1802-1811. 4. Gryshanova, I. *CFD modeling of turbine flow meters [Text]* / I. Gryshanova, I. Korobko // *Innovations on discrete productions.* – 2014. - №1. – P.6 – 8. 5. Гришанова, І.А. *Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT [Текст]: підруч. для вузів* / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с. 6. Походун, А. И. *Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений [Текст]: учеб. пособ* / А. И. Походун. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.– 112 с.

Поступила в редакцію 13.05.2015р.

Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є., докт. техн. наук, проф. Пістун Є. П.