

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА
ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 681.2.08:519.85

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ
ГАЗОГІДРОДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩ***Пістун Є. П., Матіко Г. Ф., Крих Г. Б.**Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна**E-mail: halyna.f.matiko@lpnu.ua*

Стаття присвячена вдосконаленню методів побудови дросельних схем газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів фізико-механічних параметрів плинних середовищ. Проведено огляд сучасних дросельних перетворювачів різноманітних параметрів, побудованих на різних схемах, з різною кількістю та типами дросельних елементів, з різними вихідними сигналами. Встановлено, що якість вимірювального перетворювача визначається як структурною схемою, так і конструктивними характеристиками дросельних елементів конкретної вимірювальної схеми. Для побудови газогідродинамічних перетворювачів в статті запропоновано застосувати структурний синтез в поєднанні з параметричною оптимізацією, за допомогою якої досягають заданих характеристик перетворювачів.

Метою роботи є розроблення ефективного методу побудови дросельних схем газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів фізико-механічних параметрів плинних середовищ із застосуванням структурної оптимізації схем та оцінки кожної схеми методами параметричної оптимізації за допомогою відповідного критерію, який кількісно визначає якість вимірювального перетворювача.

Для досягнення поставленої мети авторами виконано аналіз критеріїв та ресурсів структурної та параметричної оптимізації газогідродинамічних перетворювачів. Зокрема, проаналізовано такі ресурси структурного синтезу схем вимірювальних перетворювачів: порядок схеми та компонування дроселів, тип дроселів, вихідні сигнали, режим живлення перетворювача. Запропоновано підходи до параметричної оптимізації дросельних схем: на основі математичної моделі визначають цільову функцію, формують обмеження на змінні і фіксовані величини, обґрунтовують параметри оптимізації, вибирають метод оптимізації. В результаті виконаних досліджень авторами розроблено методуку структурно-параметричної оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів, яка дає змогу синтезувати дросельні схеми та будувати математичні моделі перетворювачів заданих параметрів плинного середовища із оптимальними характеристиками.

Ключові слова: *структурний синтез; параметрична оптимізація; дросельний перетворювач.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Для багатьох технологічних процесів важливою задачею є вимірювання фізико-механічних параметрів плинних середовищ, оскільки за цими параметрами у виробничих умовах дуже часто контролюють якісні показники продукції, що виготовляється. Для вимірювання динамічної, кінематичної в'язкості та густини ньютонівських рідин та газів, малих і мікровитрат газів, а також реологічних параметрів неньютонівських рідин широко застосування набув газогідродинамічний дросельний метод [1-9].

Функціональні можливості та характеристики вимірювальних перетворювачів, побудованих за цим методом, залежать від багатьох факторів: типу

та компонування дросельних елементів в схемі, виду середовища, типу вихідного сигналу тощо.

Наприклад, у [2] розглянуто перетворювач призначений для визначення цетанового числа та цетанового індексу дизпалива на основі вимірювань значень кінематичної в'язкості та густини. Протилежно ввімкнуті ламінарні і турбулентні дроселі перетворювача з'єднані у мостову вимірювальну схему. Принцип дії перетворювачів базується на зрівноваженні мостової схеми зміною загальної витрати середовища через міст. Кінематична в'язкість нафтопродукту пропорційна витраті в момент зрівноваження, а густина прямо пропорційна перепаду тиску на мості і обернено пропорційна квадрату витрати.

Для підвищення точності вимірювання в [3] пропонується пристрій, побудований на двох по-

слідовно з'єднаних гідравлічних мостах, через які рідина прокачується насосом. Перший міст складається з двох діаметрально протилежних елементів з ламінарним потоком і двох протилежно розміщених елементів, що забезпечують турбулентний потік. В другому мості, повністю складеному з турбулентних елементів, в діагоналі розміщений другий насос з постійною витратою. Перший міст зрівноважують за допомогою зміни витрати рідини. За перепадами тиску на обох мостах визначають динамічну та кінематичну в'язкість, а також густину рідини.

В перетворювачі [4] комбінованого параметра, що залежить від динамічної в'язкості та густини, застосовані також ламінарні і турбулентні дроселі, з'єднані в схему незрівноваженого гідравлічного моста, в діагоналі живлення якого підтримується постійний перепад тиску. Вихідним сигналом є перепад тиску у вихідній діагоналі моста.

В роботі [5] розглянуто перетворювачі малих і мікровитрат газів, побудованих за різними принциповими схемами: на основі одного капіляра, пакета капілярів з паралельним з'єднанням капілярів та незрівноваженого моста з капілярами різної довжини та однакового діаметра. В усіх схемах застосовано стабілізацію тиску на виході. Вихідним сигналом перетворювачів є перепад тиску.

Для неперервного вимірювання пластичної в'язкості та граничного напруження зсуву в'язкопластичних рідин, коефіцієнта консистенції та індексу потоку псевдопластичних рідин застосовують перетворювачі, побудовані за мостовою схемою, в плечі якої увімкнено ламінарні дроселі з різними геометричними розмірами. Такі перетворювачі працюють в режимі постійної витрати, а вихідні сигнали вимірюють за допомогою давачів тиску або перепаду тиску [6, 7, 8].

В [9] розглянуто пристрій, побудований на турбулентному дроселі, через який прокачують досліджуваній бензин з постійною витратою. За виміряним за допомогою дифманометра перепадом тиску на дроселі розраховують густину. На основі визначеної густини засобами штучної нейронної мережі визначають октанове число бензину.

З наведеного короткого літературного огляду видно, що гідрогазодинамічні перетворювачі мають різні принципові схеми, характеризуються різною кількістю, типами та конструктивними характеристиками дросельних елементів. Залежно від мети розроблення вони мають різні вихідні сигнали та відрізняються метрологічними характеристиками: діапазоном вимірювання, похибкою вимірювання, чутливістю, динамічними характеристиками тощо. Тому завдання проектування газогідродинамічних перетворювачів може бути вирішене методами структурно-параметричного синтезу, який застосовують до багатьох технічних об'єктів та систем, які характеризуються структурою та параметрами [10-13]. Вирішальним етапом

такого синтезу є структурно-параметрична оптимізація газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів, яка є предметом цього дослідження.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є аналіз та розроблення ефективного методу побудови газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів фізико-механічних параметрів плинних середовищ на основі синтезу множини альтернативних вимірювальних схем за допомогою структурної оптимізації та оцінки кожної схеми методами параметричної оптимізації за допомогою відповідного критерію, який кількісно визначає якість вимірювального перетворювача. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Виконати аналіз критеріїв для оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів.
2. Проаналізувати ресурси структурного синтезу схем газогідродинамічних перетворювачів для вимірювання конкретного фізико-механічного параметра плинного середовища.
3. На основі визначеного критерія оптимізації та математичного моделювання вибраної вимірювальної схеми газогідродинамічного перетворювача дослідити, які аргументи цільової функції можуть бути використані для виконання параметричної оптимізації перетворювача.
4. Розробити методіку структурно-параметричної оптимізації первинних газогідродинамічних перетворювачів фізико-механічних параметрів плинного середовища.

Аналіз критеріїв для оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів

Під час синтезу вимірювального перетворювача враховують такі основні показники: усереднена чутливість S_d ; похибка вимірювання δ ; швидкодія, яку встановлюють за сталою часу вимірювання T або за часом перехідного процесу τ ; нелінійність K_{nl} ; чутливість S_n до неінформативних параметрів; надійність; маса перетворювача; вартість; витрати на обслуговування тощо. Аналіз згаданих показників показує, що тільки показники S_d , S_n , δ , K_{nl} істотно залежать, як від структурної схеми дросельного перетворювача, так і від параметрів дроселів та параметрів середовища. В зв'язку з цим, кожен з них може бути критерієм оптимальності під час проектування оптимальних газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів. Залежно від мети розроблення конкретного вимірювального перетворювача критерій оптимальності може бути також комбінованим, складеним з цих показників із ваговими коефіцієнтами [4, 10, 13].

Вибираючи критерій оптимізації, відзначимо деякі особливості газогідродинамічних вимірюва-

льних перетворювачів. Так, нелінійність перетворення K_{nl} зменшується при збільшенні S_d , похибка вимірювання δ також взаємопов'язана із значеннями S_d і S_n . В зв'язку з цим, а також враховуючи, що проєктований перетворювач має забезпечити високу чутливість вимірювання кожного значення технологічного параметра в заданому діапазоні, то за критерій оптимальності дуже часто вибирають усереднену чутливість S_d . В загальному її визначають, як відношення зміни вихідної величини x_{out} перетворювача до зміни вхідної величини x_{in} [4]:

$$S_d = \frac{x_{out2} - x_{out1}}{x_{in2} - x_{in1}}, \quad (1)$$

де x_{out1} , x_{out2} – значення вихідної величини перетворювача, відповідно на початку та в кінці діапазону вимірювання; x_{in1} , x_{in2} – значення вхідної величини перетворювача відповідно на початку і в кінці діапазону вимірювання. Відзначимо, що оптимальне значення чутливості S_d для газогідродинамічного вимірювального перетворювача залежатиме як від структурної схеми перетворювача, так і від параметрів оптимізації.

Отже, синтез газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів параметрів плинних середовищ передбачає застосування структурно-параметричної оптимізації, як інструмента для досягнення заданих вимог до характеристик вимірювальних перетворювачів. Спочатку розглянемо концепцію структурного синтезу для вибору схеми та елементів газогідродинамічних перетворювачів конкретного технологічного параметра, на основі якої можна задовольнити бажані характеристики вимірювального перетворювача. Ці характеристики, в свою чергу, забезпечуються методами параметричної оптимізації, яка є невід'ємною складовою синтезу газогідродинамічного перетворювача. Вона полягає у визначенні конструктивних розмірів дросельних елементів в схемі, за яких вибрані критерій оптимізації досягає екстремального значення.

Аналіз ресурсів структурної оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів

Для вирішення задачі структурної оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів авторами запропоновано такі ресурси структурного синтезу: порядок схеми та компоновання дроселів в схемі, тип дроселів у схемі, вимірювальні канали схеми та режим живлення перетворювача.

Структура дросельної схеми визначається кількістю дросельних елементів (порядком схеми) та їх компонованням у схемі. Для синтезу всіх можливих варіантів побудови дросельних схем на базі певної кількості елементів авторами запропонова-

но математичний апарат на основі теорії множин та комбінаторного аналізу. Для опису послідовного з'єднання дросельних елементів застосовано поняття кортежу, а для опису схем з паралельним з'єднанням елементів запропоновано нове поняття – шеренги, як сукупності елементів, в якій зміна їх послідовності, на відміну від кортежів, не створює іншої шеренги. Множина, утворена об'єднанням кортежів та шеренг, містить усі можливі варіанти побудови дросельних схем з різними типами з'єднання дроселів [14].

Для забезпечення функціональних можливостей вимірювальних перетворювачів у схемах застосовують різні типи дросельних елементів, які залежно від їх конструктивних характеристик та умов руху плинних середовищ поділяють на ламінарні і турбулентні. Витратні характеристики різних типів дроселів, які детально розглянуто в [15], відображають взаємозв'язок між витратою середовища, його параметрами, тиском на вході і виході дроселя та його конструктивними характеристиками. Інформація про типи дроселів разом з послідовністю їх з'єднання у дросельній схемі необхідні для побудови математичної моделі вимірювального перетворювача заданого параметра.

В схемі вимірювального перетворювача можуть бути реалізовані різні вимірювальні канали з певним типом вихідного сигналу (перепад тиску, витрата, тиск) залежно від вимог вимірювання конкретного параметра. Слід зазначити, що для вимірювання одного параметру може бути застосований один з цих сигналів або їх комбінації, для вимірювання двох і більше параметрів – декілька вимірювальних каналів. Авторами розроблена методика математичного опису дросельних схем із вимірювальними каналами у вигляді графів, відповідно до якої місця з'єднання дросельних елементів є вершинами графа, а вимірювальні канали – ребрами графа. Запропонована методика дає змогу досліджувати функціональні можливості схем із різними вимірювальними каналами з метою синтезу принципової схеми вимірювального перетворювача заданих параметрів плинного середовища [7].

З метою стабілізації неінформативних параметрів, які входять у математичну модель газогідродинамічного перетворювача, у схемі реалізують відповідний режим живлення (режим постійної витрати, постійного тиску, постійного перепаду тиску). Для створення таких режимів у дросельній схемі слід передбачити додаткові технічні засоби, які забезпечують вимірювання чи стабілізацію необхідних величин – вимірювальні перетворювачі тиску, перепаду тиску, витрати, температури або системи регулювання чи стабілізатори цих величин [16].

Для побудови структурної схеми газогідродинамічного вимірювального перетворювача конкретного фізико-механічного параметра аналізують ре-

сурси структурного синтезу та обґрунтовують порядок схеми, тип та послідовність з'єднання дросельних елементів у схемі, вимірювальні канали перетворювача, режим живлення схеми і переходять до параметричної оптимізації перетворювача.

Параметрична оптимізація газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів

Для вибраного критерія та синтезованої вимірювальної схеми газогідродинамічного перетворювача задачу параметричної оптимізації сформулюємо так: знайти оптимум цільової функції

$$F(P_{in}, P_{out}, Q, B_p, B_c, B_e), i \in S \quad (2)$$

з обмеженнями

$$R_j(P_{in}, P_{out}, Q, B_c, B_e), j = J, \quad (3)$$

де S – порядок дросельної схеми перетворювача; J – множина обмежень. Частина аргументів функції F можна змінювати, інші є фіксованими. Обмеження на змінні і фіксовані величини формують область їх допустимих значень або встановлюють додаткові залежності між ними. Так, під час проектування газогідродинамічних перетворювачів існують обмеження на параметри живлення ($P_{in} \leq P_{inh}, P_{out} \geq P_{outl}, Q_l \leq Q \leq Q_h$) і конструктивні характеристики дросельних елементів ($d_{il} \leq d \leq d_{ih}, L_{il} \leq L \leq L_{ih}$). Індеси 'l' і 'h' в позначеннях вказують на нижню і верхню межу числових значень змінних. В [15] показано, що математичні моделі дроселів, а відповідно і їх застосування, мають обмеження, зокрема за гідродинамічним критерієм (число Рейнольдса Re), при недотриманні яких порушується адекватність моделей дросельних елементів. Для забезпечення ламінарного режиму руху в прохідних каналах дроселів має виконуватись умова $\frac{4Q_i}{\pi d_i \mu_l} \leq Re_{lamh}$, для турбулентного (перехідного) режиму – $\frac{4Q_i}{\pi d_i \mu_h} \geq Re_{urbl}$.

Цільова функції (2), яка виражає залежність вибраного критерія від параметрів дросельних елементів і середовища, а також від параметрів живлення може бути лінійною і нелінійною, у тому числі з явно вираженим екстремумом.

Модель найпростішого вимірювального перетворювача, який будують на одному дросельному елементі ($S=1$), відповідає рівнянню його витратної характеристики

$$Q = f(P_{in}, P_{out}, B_c, B_p, B_e), \quad (4)$$

де Q – масова витрата рідини через дросель; P_{in} і P_{out} – абсолютні тиски рідини відповідно на вході і на виході дроселя; B_c, B_p і B_e – конструктивний, параметричний та емпіричний комплекси, що від-

повідно визначаються конструкцією дроселя, параметрами рідини, що протікає через дросель, та емпіричними коефіцієнтами, які враховують реальність рідини і термодинамічних процесів її протікання в дросельному елементі.

У модель (4) входить конструктивний комплекс B_c , який безпосередньо залежить від конструктивних характеристик дроселя. Найчастіше у дросельних перетворювачах застосовують ламінарний дросель типу циліндричної трубки з діаметром d і довжиною L каналу трубки і конструктивним комплексом $B_c = f_1(d, L)$ чи турбулентний дросель типу циліндричного отвору в тонкій стінці з діаметром d , для якого конструктивний комплекс $B_c = f_1(d)$. Для витратних характеристик багатьох дросельних елементів функція f_1 може бути виражена в явному вигляді, що дає можливість при моделюванні дросельних схем та параметричній оптимізації користуватись лише величиною B_c замість окремих конструктивних характеристик дроселя [16].

Комплекс B_p залежить від параметрів та типу середовища, що протікає через дросель:

- для нестискуваної ньютонівської рідини:

$$B_p = f_2(\mu, \rho),$$

- для стискуваної ньютонівської рідини (газу):

$$B_p = f_2(\mu, \rho, \chi),$$

- для неньютонівської в'язко-пластичної рідини:

$$B_p = f_2(\eta, \tau_0, \rho),$$

де μ і ρ – в'язкість і густина середовища; χ – показник адіабати середовища; η – пластична в'язкість; τ_0 – граничне напруження зсуву. Вигляд функції f_2 залежить від типу дросельного елемента. Для деяких дроселів функція f_2 також може бути виражена в явному вигляді.

Оскільки розглянуті параметри рідини та конструктивні параметри дроселів залежать від температури, то комплекси B_c і B_p також залежать від температури.

Комплекс B_e відповідно до вищевказаного означення залежить від емпіричних коефіцієнтів, що фігурують у витратних характеристиках дросельних елементів. Так, наприклад, для ламінарного дроселя типу циліндричної трубки та нестискуваної ньютонівської рідини маємо наступне: $B_e = f_3(m)$, де m – емпіричний коефіцієнт, який враховує гідродинамічні входні ефекти на трубі; для турбулентного дроселя типу циліндричного отвору в тонкій стінці: $B_e = f_3(\alpha)$, де α – емпіричний коефіцієнт витрати дроселя.

Математичні моделі дросельних елементів є відомі [15]. Так, наприклад, при ламінарному русі

нестискуваної рідини в довгій капілярній трубці витратна характеристика має вигляд:

$$Q = \frac{\pi d^4 \rho}{128L \mu} (P_{in} - P_{out}), \quad (5)$$

а в короткій трубці при цих же умовах руху:

$$Q = \frac{4\pi L \mu}{m} \left[\sqrt{1 + \frac{m\rho d^4 (P_{in} - P_{out})}{256L^2 \mu^2}} - 1 \right], \quad (6)$$

де Q – масова витрата середовища у трубці; P_{in} і P_{out} – тиск середовища відповідно на вході і на виході дроселя; d і L – діаметр і довжина трубки; μ – динамічна в'язкість середовища; ρ – густина середовища.

Для дроселя типу отвору в тонкій стінці (діафрагма) при турбулентному русі нестискуваної рідини витратна характеристика має вигляд:

$$Q = \frac{\pi \alpha d^2}{4} \sqrt{2(P_{in} - P_{out}) \rho}. \quad (7)$$

З витратних характеристик дросельних елементів визначають конкретний вигляд залежностей для комплексів B_c , B_p і B_e . Так, наприклад,

для витратної характеристики (5) маємо $B_c = \frac{d^4}{L}$ і

$B_p = \frac{\rho}{\mu}$, а для витратної характеристики (7) –

$B_c = d^2$; $B_p = \sqrt{\rho}$; $B_e = \alpha$.

Із рівнянь (6) і (7), а також з інших рівнянь витратних характеристик дроселів [15] видно, що більшість з них є нелінійними. У зв'язку з цим будь-яка вимірювальна система, побудована на дросельних елементах, буде мати властивості, обумовлені у тому числі їх нелінійністю.

Для найпростішого вимірювального перетворювача динамічної в'язкості, побудованого, наприклад, на одному ламінарному дроселі (рис. 1, а) з характеристикою (5) цільова функція S_d є лінійною відносно конструктивного комплексу

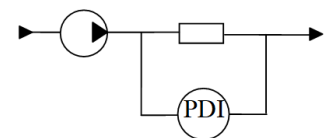
$B_c = \frac{d^4}{L}$ і задача оптимізації має місце завдяки

таким обмеженням: $L \leq L_h$, $d \geq d_l$, $\frac{4Q}{\pi d \mu_l} \leq Re_{lamh}$.

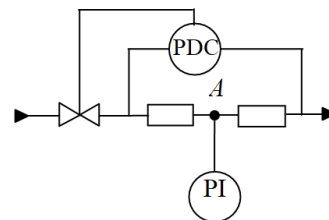
Математичну модель дросельної схеми другого порядку з двома послідовно з'єднаними дроселями знаходять із системи рівнянь [16]:

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 = Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{in}, P_A, B_{c1}, B_p, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_A, P_{out}, B_{c2}, B_p, B_{e2}), \end{cases} \quad (8)$$

де Q_{II} – масова витрата рідини через схему другого порядку; Q_i – масова витрата рідини через дросель, $i=1, 2$; P_{in} і P_{out} – абсолютні тиски рідини відповідно на вході і на виході схеми другого порядку; B_{c1}, B_p і B_{e1} – відповідно комплекси, що визначаються конструкцією дроселя, параметрами вимірюваного середовища та емпіричними коефіцієнтами; P_A – міждросельний тиск, а індекси 1 і 2 відносять змінні в системі рівнянь (8) відповідно до першого і другого по ходу руху середовища дросельного елемента



а) $X \Rightarrow \Delta P$



б) $X \Rightarrow P_A$

Рис. 1. Приклади схем вимірювальних перетворювачів параметра X , де: а) схема, що працює в режимі постійної об'ємної витрати і побудована на одному дроселі з вихідним сигналом у вигляді перепаду тиску ΔP ; б) схема, що працює в режимі постійного перепаду тиску і побудована на двох дроселях з вихідним сигналом у вигляді міждросельного тиску P_A

Для більшості типів дросельних елементів систему (8) можна розв'язати аналітично.

Розглянемо для прикладу перетворювач параметра, побудованого за схемою рис. 1, б, який працює в режимі постійного перепаду тиску на двох послідовно з'єднаних дроселях. Якщо перший дросель є турбулентним з витратною характеристикою (7), а другий – ламінарним з витратною характеристикою (5), то комплекси моделі (8) мають вигляд:

$$B_{c1} = d^2; B_{p1} = \sqrt{\rho}; B_{e1} = \alpha, \text{ а } B_{c2} = d^4/L; B_{p2} = \mu/\rho.$$

Вимірюваною величиною такого перетворювача є параметр $B_p = \mu^2/\rho$, а вихідним сигналом – міждросельний тиск P_A [4].

Задача оптимізації для такої схеми може вирішуватися класичними методами математичного аналізу. Особливістю аналітичного вирішення за-

дачі оптимізації вказаного перетворювача з цільовою функцією S_d є можливість вибрати параметр оптимізації не як окремий комплекс B_{c1}, B_{c2} або геометричний розмір дроселів, а як комбінований

комплекс $B_c = \frac{2048\alpha^2 d_1^4 L^2}{d_2^8}$, що спрощує пошук

оптимуму. При оптимізації цього вимірювального перетворювача необхідно враховувати такі обмеження на конструктивні характеристики дроселів $d_{1l} \leq d_1 \leq d_{1h}, L_l \leq L \leq L_h, d_{2l} \leq d_2 \leq d_{2h}$ та обмеження на режимні параметри $\frac{4Q}{\pi d_1 \mu_h} \geq \text{Re}_{turb1}$,

$\frac{4Q}{\pi d_2 \mu_l} \leq \text{Re}_{lamh}, \Delta P_l \leq \Delta P \leq \Delta P_h$, де $\Delta P = P_{in} - P_{out}$.

Для дросельної схеми другого порядку, утвореної паралельним з'єднанням дросельних елементів, витратна характеристика визначається із системи рівнянь, в якій індекси 1 і 2 відносять змінні відповідно до верхнього і нижнього дроселя [16]:

$$\begin{cases} Q_{II} = Q_1 + Q_2; \\ Q_1 = f_1(P_{in}, P_{out}, B_{c1}, B_p, B_{e1}); \\ Q_2 = f_2(P_{in}, P_{out}, B_{c2}, B_p, B_{e2}). \end{cases} \quad (9)$$

У загальному вигляді витратну характеристику дросельної схеми другого порядку, яку отримуємо із системи рівнянь (8) та системи рівнянь (9), можна записати:

$$Q_{II} = f(P_{in}, P_{out}, B_p, B_{c1}, B_{c2}, B_{e1}, B_{e2}). \quad (10)$$

Узагальнюючи витратну характеристику дросельної схеми S -го порядку, можна записати у вигляді [16]:

$$Q_S = f(P_{in}, P_{out}, B_p, B_{c1}, B_{c2}, \dots, B_{c_s}, B_{e1}, B_{e2}, \dots, B_{e_s}). \quad (11)$$

Задачу параметричної оптимізації більш складних схем високого порядку доцільно розв'язувати методами нелінійного програмування.

Підсумовуючи вищесказане, підкреслимо, що параметрами оптимізації для газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів доцільно вибирати не окремі конструктивні характеристики дроселів, а їх комбінації у вигляді конструктивних комплексів. Тоді параметрична оптимізація газогідродинамічного перетворювача спрощується, але на загал залишається ітераційним процесом, який полягає у тому, щоб знайти такі конструктивні характеристики дроселів перетворювача, при яких вибраний критерій оптимальності набуде екстремального значення при заданих обмеженнях на конструктивні характеристики дросельних елементів, на режим руху (турбулентний чи ламінарний) середовища в каналах дросельних елементів, а також на параметри живлення перетворювача.

Методика побудови газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів із застосуванням структурно-параметричної оптимізації

Запропонований підхід до структурного синтезу схем та застосування методів параметричної оптимізації дав змогу авторам розробити методику побудови оптимальних вимірювальних газогідродинамічних перетворювачів, суть якої наведена нижче.

1. Визначають завдання побудови вимірювального перетворювача – параметр (чи параметри), який необхідно вимірювати, діапазон вимірювання, тип плинного середовища, задають вимоги до метрологічних та технічних характеристик вимірювального перетворювача.

2. Формують критерій, який має задовольнити мету проєктування вимірювального перетворювача. Проведений авторами аналіз показників вимірювальних перетворювачів показав, які саме критерії доцільно застосувати для оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів.

3. Відповідно до задачі вимірювання параметрів плинного середовища вибирають певну дросельну вимірювальну схему. Тобто задають порядок схеми, який визначається кількістю дросельних елементів у схемі, та компонують дроселі в схемі. При цьому враховують кількість вимірюваних параметрів, властивості середовища тощо. Для синтезу та аналізу можливих варіантів побудови дросельних схем вибраного порядку авторами розроблений математичний апарат на основі теорії множин та комбінаторного аналізу.

4. Вибирають тип дросельних елементів у схемі, на базі яких можливе вимірювання заданих параметрів. В роботі [15] авторами виконано детальний аналіз та систематизацію сучасних моделей дросельних елементів різних типів.

5. Будують математичну модель вимірювального перетворювача. В загальному математична модель газогідродинамічного вимірювального перетворювача містить параметри, які необхідно вимірювати, конструктивні характеристики дроселів та режимні параметри перетворювача.

6. На основі отриманої математичної моделі аналізують можливі вимірювальні канали з певним типом вихідного сигналу вимірювального перетворювача з метою вибору тих, які придатні для реалізації задачі вимірювання конкретного параметра. Для випадків, коли вихідним сигналом перетворювача є перепад тиску, для аналізу можливих вимірювальних каналів схеми доцільно застосувати розроблену авторами методику математичного опису дросельних схем із застосуванням теорії графів.

7. На основі розробленої математичної моделі визначають, які параметри доцільно застabilізувати і відповідно до цього визначають режим живлення вимірювального перетворювача (режи-

ми постійної витрати, або постійного перепаду тиску, постійного тиску в певних вузлах вимірювальної схеми тощо). Залежно від вибраного режиму приймають рішення про оснащення схеми допоміжними елементами (стабілізатори тиску, перепаду тиску, температури, дифманометри, витратоміри, задавачі витрати тощо).

8. Далі формують цільову функцію, яка математично описує залежність вибраного критерія від змінних, які входять у математичну модель вимірювального перетворювача. Цільову функцію доповнюють обмеженнями на конструктивні характеристики дроселів та режимні параметри перетворювача у вигляді нерівностей. Для вибраної структурної схеми та вибраного режиму живлення схеми вибирають керовані змінні, тобто параметри оптимізації. Зазвичай такими параметрами можуть бути конструктивні характеристики дроселів чи конструктивні комплекси або режимні параметри вимірювальної схеми.

9. Здійснюють параметричну оптимізацію за допомогою вибраного методу оптимізації. Для простих схем це можуть бути метод лінійного програмування або класичний метод математичного аналізу, для складніших схем – методи нелінійного програмування.

10. Знайдені оптимальні значення параметрів та цільової функції застосовують для перевірки досягнення заданих характеристик перетворювача. Якщо характеристики вимірювального перетворювача не відповідають заданим, тоді переходять до пунктів 2-9 даної методики і застосовують інші ресурси структурної і параметричної оптимізації або в разі потреби, змінюють критерій оптимальності, доки не досягнуть мети проектування вимірювального перетворювача.

Висновки

У роботі запропоновані нові підходи до синтезу дросельних схем газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів фізико-механічних параметрів плинних середовищ із застосуванням структурно-параметричної оптимізації. Визначені та обґрунтовані критерії для оптимізації вимірювальних перетворювачів. Виконано аналіз ресурсів структурного синтезу схем газогідродинамічних перетворювачів для вимірювання конкретного параметра середовища: порядок схеми та компонування дроселів, тип дросельних елементів, вимірювальні канали з певним типом вихідного сигналу, режим живлення вимірювального перетворювача. Описано підходи до параметричної оптимізації дросельних схем газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів: визначення цільової функції, формування обмежень на змінні і фіксовані величини, обґрунтування параметрів оптимізації, вибір методу оптимізації.

Застосовуючи запропонований підхід до структурного синтезу схем та їх параметричної

оптимізації авторами розроблено методику структурно-параметричної оптимізації газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів, яка дає змогу синтезувати принципіві схеми та математичні моделі перетворювачів заданих фізико-механічних параметрів плинного середовища із оптимальними метрологічними чи технічними характеристиками. Отримані результати дають змогу алгоритмізувати процес синтезу схем газогідродинамічних вимірювальних перетворювачів заданих параметрів плинних середовищ і є теоретичною основою для створення системи автоматизованого проектування таких перетворювачів.

Література

- [1] L. A. Zalmanzon, *Components for Pneumatic Control Instruments: The Static and Dynamic Characteristics of Pneumatic Resistances, Capacitances and Transmission Lines*, Pergamon, 2014.
- [2] В. В. Древецький, М. М. Клепач, “Пристрій для вимірювання якісних показників нафтопродуктів”, *U.A. Патент №66327*, бюл. № 24, 2011.
- [3] M. Tournier, M. S. Aignan, “Device for Measuring the Viscosity of Fluid”, *U.S. Patent 4,384,472*, 1983.
- [4] Ye. P. Pistun, H. F. Matiko, H. B. Krykh, F. D. Matiko, “Modeling throttle bridge measuring transducers of physical-mechanical parameters of Newtonian fluids”, *Mathematical Modeling and Computing*, vol. 8, no. 3, pp. 515–525, 2021. DOI: 10.23939/mmc2021.03.515
- [5] Z. Teplukh, I. Dilay, I. Stasiuk, M. Tykhan, I. Kubara, “[Design of linear capillary measuring transducers for low gas flow rates](#)”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6/5(96), pp. 25–32, 2018. Doi: [10.15587/1729-4061.2018.150526](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150526)
- [6] В. В. Воєвода, В. В. Древецький, “Пристрій для вимірювання реологічних параметрів в'язкопластичних рідин”, *U.A. Патент №102560*, бюл. №21, 2015.
- [7] Ye. Pistun, H. Matiko, H. Krykh, F. Matiko, “Structural Modeling of Throttle Diagrams for Measuring Fluid Parameters”, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 25(4), pp. 659–673, 2018.
- [8] Ye. Pistun, H. Matiko, H. Krykh, F. Matiko, “Synthesizing the Schemes of Multifunctional Measuring Transducers of the Fluid Parameters”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 5(90), pp. 13–22, 2017. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114110>
- [9] В. В. Древецький, М. М. Клепач, “Спосіб визначення октанового числа автомобільних бензинів”, *U.A. Патент №75959*, бюл. №24, 2012.
- [10] І. В. Коробко, “Оптимізація вимірювальних

- перетворювачів витрати рідини гідродинамічного типу”, *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*, вип. 46, с. 91–96, 2013.
- [11] K. Ravichandran, N. Masoudi, G. M. Fadel, M. M. Wiecek, “Parametric Optimization for Structural Design Problems”, *ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Volume 2B: 45th Design Automation Conference*, Anaheim, California, USA, 2019. <https://doi.org/10.1115/DETC2019-97860>
- [12] N. Zosimovych, “Structural and parametric optimization for flight vehicle structures”. *XII International Scientific and Practical Conference: “Areas of Scientific Thought - 2016/2017”*, Sheffield, UK, 2017, vol. 8, pp. 59–68.
- [13] В. В. Древецький, В. П. Квасніков, “Оптимізація геометричних розмірів дрoсельних подільників гідродинамічних вимірювальних схем”, *Збірник наукових праць ВІКНУ*, вип.16, с.18–23, 2008.
- [14] С. П. Пістун, Г. Ф. Матіко, Г. Б. Крих, “Модельовання схем вимірювальних перетворювачів із застосуванням теорії множин”, *Метрологія та прилади*, вип.3, с. 53–61, 2016.
- [15] Ye. Pistun, H. Matiko, H. Krykh, “[Mathematical Models of Throttle Elements of Gas-hydrodynamic Measuring Transducers](#)”, *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 5(2), pp. 94–107, 2019. DOI: 10.23939/jeecs2019.02.094
- [16] С. П. Пістун, Г. Ф. Леськів, “Газогідродинамічні вимірювальні перетворювачі на складених дрoсельних елементах”, *Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація: Вісник НУ “ЛП”*, № 460, с.81–88, 2002.

УДК 681.2.08:519.85

Е. П. Пістун, Г. Ф. Матіко, Г. Б. Крих*Національний університет «Львівська політехніка, Львів, Україна***СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЗОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕКУЧИХ СРЕД**

Статья посвящена усовершенствованию методов построения дрoсельных схем газогидродинамических измерительных преобразователей физико-механических параметров текучих сред. Проведен обзор современных дрoсельных преобразователей различных параметров, построенных на разных схемах, с разным количеством и типами дрoсельных элементов, с разными выходными сигналами. Установлено, что качество измерительного преобразователя определяется как структурной схемой, так и конструктивными характеристиками дрoсельных элементов конкретной измерительной схемы. Для построения газогидродинамических преобразователей в статье предложено применить структурный синтез в сочетании с параметрической оптимизацией, с помощью которой достигают заданных характеристик преобразователей.

Целью работы является разработка эффективного метода построения дрoсельных схем измерительных газогидродинамических преобразователей физико-механических параметров текучих сред с применением структурной оптимизации схем и оценки каждой схемы методами параметрической оптимизации с помощью соответствующего критерия, который количественно определяет качество измерительного преобразователя.

Для достижения поставленных целей авторами выполнен анализ критериев и ресурсов структурной и параметрической оптимизации газогидродинамических преобразователей. В частности, проанализированы следующие ресурсы структурного синтеза схем измерительных преобразователей: порядок схемы и компоновка дрoселей, тип дрoселей, выходные сигналы, режим питания преобразователя.

Предложены подходы к параметрической оптимизации дрoсельных схем: на основе математической модели определяют целевую функцию, формируют ограничения на переменные и фиксированные величины, обосновывают параметры оптимизации, выбирают метод оптимизации.

В результате выполненных исследований авторами разработана методика структурно-параметрической оптимизации газогидродинамических измерительных преобразователей, которая позволяет синтезировать дрoсельные схемы и создавать математические модели преобразователей заданных параметров текучей среды с оптимальными характеристиками.

Ключевые слова: структурный синтез; параметрическая оптимизация; дрoсельный преобразователь.

Ye. P. Pistun, H. F. Matiko, H. B. Krykh*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine***STRUCTURAL AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF GAS-HYDRODYNAMIC MEASURING TRANSDUCERS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS OF FLUIDS**

The article is devoted to improving the methods for building throttle diagrams of gas-hydrodynamic measuring transducers of physical and mechanical parameters of fluids. The authors reviewed modern throttle transducers of various parameters, built on different diagrams, with different numbers and types of throttle elements, with different output signals. We established that the goodness of the measuring transducer is determined both by the structural diagram and the design characteristics of the throttle elements of a specific measuring diagram. The article proposes using structural synthesis with parametric optimization to achieve the specified characteristics of the gas-hydrodynamic transducers.

The aim is to develop an effective method for building throttle diagrams of gas-hydrodynamic measuring transducers of physical and mechanical parameters of fluids using structural optimization of diagrams and to evaluate each diagram using parametric optimization methods with the appropriate criterion that quantifies the goodness of the measuring transducer.

To achieve this goal, the authors analyzed the criteria and resources of structural and parametric optimization of gas-hydrodynamic transducers. In particular, the following resources of structural synthesis of measuring transducers' diagrams are analyzed: diagram order and throttle arrangement, type of throttles, output signals, supply mode of the transducer. Approaches to parametric optimization of throttle diagrams are offered: based on the mathematical model, one defines the objective function, forms restrictions on variable and fixed values, substantiates optimization parameters, chooses the optimization method.

As a result of the research, the authors developed a technique for structural and parametric optimization of gas-hydrodynamic measuring transducers, making it possible to synthesize throttle diagrams and build mathematical models of transducers of specific parameters of the fluid with optimal characteristics.

Keywords: structural synthesis; parametric optimization; throttle transducer.

*Надійшла до редакції
23 вересня 2021 року*

*Рецензовано
30 жовтня 2021 року*

УДК 681.26

АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВАЖІЛЬНИХ СИЛОВІДТВОРЮЮЧИХ УСТАНОВОК

Ціпоренко О. В.

Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів» (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Київ, Україна

E-mail: tsiporenko@gmail.com

Державні еталони є основою технічної бази державної метрологічної системи. Створення державного первинного еталону одиниці сили вирішує такі завдання, як забезпечення єдності вимірювань сили, передавання розміру одиниці сили із необхідною точністю, метрологічне забезпечення численного парку робочих еталонів і робочих засобів вимірювальної техніки, що застосовуються в Україні та країнах ближнього зарубіжжя. Одним з основних етапів створення державного еталона є розробка математичної моделі процесу відтворення розміру одиниці фізичної величини, а саме Н – ньютонів. Силівідтворюючі установки, що застосовуються калібрувальними лабораторіями як правило, простежуються до національного еталонів через зв'язки за допомогою прецизійних перетворювачів сили.

Калібрування силівимірювальних приладів, як правило, буде проводитися на цих установках відповідно до документованої процедури, наприклад ISO 376, і складові похибки та невизначеності результатів калібрування будуть залежати від калібрувальних та вимірювальних можливостей установок відтворення розміру одиниці сили. Аналогічно, похибка результатів вимірювання при калібрування промислового обладнання, що вимірює силу, буде частково залежати від невизначеності та похибки, що виникає від приладу для вимірювання сили, і похибка будь-якого подальшого вимірювання сили частково залежатимуть від похибки, пов'язаної з відтворенням одиниці сили, у тому числі і національним еталоном. Можна помітити, що похибка та невизначеність остаточного вимірювання сили залежить від усіх попередніх етапів вимірювання, і ця робота має на меті дати рекомендації щодо того, як можна оцінити ці внески.