

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВИТРАТ ГАЗУ
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 681.586.776:621.382
ББК 32.96-04:32.844.1
О-72

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 23.02.2012 р.)

Рецензенти:

Р. Н. Квєтний, доктор технічних наук, професор

В. М. Кичак, доктор технічних наук, професор

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

Осадчук, В. С.

О-72 Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко — Вінниця : ВНТУ, 2012. — 140 с.
ISBN 978-966-641-492-5

В монографії проаналізовано сучасний стан перетворювачів витрат газу, подано основи побудови радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. Розглянуто принципи побудови, електричні схеми і експериментальні дослідження основних параметрів радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються проектуванням і розробкою мікроелектронних перетворювачів витрат газу, аспірантів та студентів вищих технічних навчальних закладів.

УДК 681.586.776:621.382
ББК 32.96-04:32.844.1

ISBN 978-966-641-492-5

© В. Осадчук, О. Осадчук, Ю. Ющенко, 2012

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТ	7
1.1 Перетворювачі витрат змінного перепаду тиску	8
1.2 Перетворювачі витрат з гідравлічним опором і відцентровим принципом дії	11
1.3 Перетворювачі витрат обтікання.....	14
1.4 Тахометричні перетворювачі витрат і лічильники кількості.....	16
1.5 Теплові перетворювачі витрат	19
1.6 Електромагнітні перетворювачі витрат	26
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ВИТРАТ ГАЗУ	30
2.1 Конвективний процес теплообміну	30
2.2 Математична модель теплових процесів радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу	35
2.3. Визначення функції перетворення термочутливих елементів радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу	44
РОЗДІЛ 3 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВИТРАТ ГАЗУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР	47
3.1. Розрахунки вольт-амперної характеристики радіовимірювального мікроелектронного перетворювача газу на основі структури з польового і біполярного транзисторів	47
3.2 Розрахунки вольт-амперної характеристики радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі біполярної транзисторної структури	54
3.3 Функція перетворення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу на основі польових і біполярних транзисторів	59
3.4 Функція перетворення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу на основі біполярних транзисторів	66

РОЗДІЛ 4 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВИТРАТ ГАЗУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З АКТИВНИМ ІНДУКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ	74
4.1 Розрахунки вольт-амперної характеристики радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі структури з польового і біполярного транзисторів з активним індуктивним елементом .	74
4.2 Розрахунки ВАХ радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом.....	80
4.3 Функція перетворення радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу на основі польових і біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом	83
4.4 Функція перетворення радіовимірювального мікроелектронного перетворювача витрат газу на основі біполярних транзисторних структур з активним індуктивним елементом	90
4.5 Опис експериментальної установки	95
РОЗДІЛ 5 ВИКОРИСТАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ПРИСТРОЇВ У НАФТОГАЗОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	97
5.1 Сучасні вимоги до приладів для вимірювання витрат газу	97
5.2 Застосування мікропроцесорів у системах вимірювання витрат газу у нафтогазовій промисловості	99
5.3 Розрахунок похибок вимірювання пристрою вимірювання витрат газу	103
5.4 Вибір критеріїв оцінювання технічного рівня розроблених перетворювачів витрат газу	116
5.5 Рекомендації по проектуванню радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу	119
ЛІТЕРАТУРА.....	128

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Q – витрати газу

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

МП – мікропроцесор

МК – мікроконтролер

F – частота

δ_{kl} – похибка квантування періодоміра

δ_U – похибка від коливання напруги живлення

δ_T – похибка при вимірюванні температури

δ_p – похибка при вимірюванні тиску

δ_ρ – похибка при вимірюванні густини газу

δ_φ – похибка при вимірюванні вологості газу

δ_Σ – сумарна похибка

\dot{S} – швидкість зміни чутливості

\ddot{S} – прискорення зміни чутливості

$\dot{\beta}$ – коефіцієнт впливу впливових величин на вихідний параметр

$\ddot{\beta}$ – прискорення зміни коефіцієнта впливу впливових величин на вихідний параметр

α – коефіцієнт впливу впливових величин на номінальну чутливість

Δ_n – похибка нелінійності

Δ_m – мультиплікативна похибка

Δ_a – адитивна похибка

N_j – комплексний показник технічного рівня пристрою

ВСТУП

На теперішньому етапі розвитку науково-технічного прогресу аналітичне приладобудування є однією з нових областей використання мікроелектроніки, яка за допомогою групових методів технології дозволяє розробляти та створювати сенсори для контролю технологічних процесів, параметрів навколишнього середовища. Створення вимірювальних перетворювачів є одною з актуальних проблем сьогодення. Вдосконалення систем автоматичного контролю і управління різними об'єктами, процесами, виробництвами визначається досягненнями в цій галузі.

Загальна тенденція в розвитку вимірювальних перетворювачів, в тому числі і перетворювачів витрат, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному ускладненні експлуатаційних умов. Все це змушує проводити пошуки і розробку нових методів вимірювання, які б дозволили вирішити задачі, що з'являються у зв'язку з потребами практики.

Одну із провідних позицій в науковому світі щодо розробки первинних перетворювачів займає Україна. Це насамперед стало можливим завдяки роботі відомих українських вчених І. М. Вікуліна [1, 2], З. Ю. Готри [3 – 6], М. Д. Кошового [7, 8], В. Л. Костенка [9], В. В. Кухарчука [10], В. П. Манойлова [11, 12], Я. Т. Луцика [13, 14], В. С. Осадчука [15 – 20], О. В. Осадчука [16 – 22], Е. П. Пістуна [23], В. О. Поджаренка [24], В. О. Романова [25, 26], Б. І. Стадника [13, 14], Ю. О. Скрипника [27, 28], В. М. Шарапова [29, 30], М. А. Філінюк [41 – 43], В. М. Кичак [44], О. П. Яненка [12], а також закордонних вчених В. М. Арутюняна [31], Ж. Аша [32], А. І. Бутурліна [33, 34], Г. Віглеба [35], П. П. Кремлівського [36, 37], П. В. Новицького [38], В. І. Стафеева [1, 2], А. М. Турічина [39], Д. Ю. Ейдукаса [40] та інших.

Дослідження і розробка радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом виконані на кафедрах електроніки та радіотехніки Вінницького національного технічного університету. Мета монографії полягає в тому, щоб надати допомогу в розробці аналітичних та експериментальних методів з реалізації радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат газу з частотним виходом.

Автори вдячні рецензентам доктору технічних наук, професору Р. Н. Кветному, доктору технічних наук, професору В. М. Кичаку і доктору технічних наук, професору В. П. Манойлову, корисні зауваження яких сприяли поліпшенню змісту книги.

Відгуки про книгу, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою видавництва: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТ

Роль і значення сенсорів зростає з кожним роком, оскільки сенсори проявляють себе в якості ключової технології в процесах автоматизації майже всіх галузей промисловості [45]. Подальший розвиток нанотехнологій, який охоплює всі галузі виробництва, змінює і вимоги до сенсорів: на зміну громіздким, ненадійним приладам повинні прийти сенсори, сумісні з іншими виробами наноелектроніки. Основні вимоги до таких сенсорів: висока точність, однозначність, швидкість вимірювання, інтеграція в одному пристрої чутливого елемента та схеми перетворення сигналів, вибірковість, тобто здатність виділення даного впливу на фоні інших зовнішніх факторів, багатофункціональність, тобто здатність до одночасного контролю декількох різних впливів, низька вартість, працездатність у жарких експлуатаційних умовах, надійність, довговічність [46].

Серед сенсорів важливе місце посідають сенсори витрат газу і рідини, які на теперішній час мають широкий спектр використання. Вони необхідні для проведення наукових досліджень, для керування технологічними процесами майже в усіх галузях виробництва, для контролю роботи стаціонарних і транспортних енергетичних установок, для керування літаками і космічними кораблями. Окрім цього, такі прилади потрібні для комунального та сільського господарства [36].

Без витратомірів неможливо забезпечити оптимальний технологічний режим у таких галузях промисловості, як енергетична, металургійна, нафтова, хімічна, целюлозно-паперова, харчова тощо. Без цих приладів не можна також і автоматизувати відповідні процеси, і отримати в них максимальне значення коефіцієнта корисної дії. Таким чином, витратоміри сприяють підвищенню якості виготовлення продукції, усуненню браку, економії вихідних матеріалів і автоматизації виробництва.

За останні роки накопичено значний досвід розробки витратомірів, які базуються як на основі безконтактних, так і контактних методів вимірювання витрат. Розвиток безконтактного теплового методу відбувається у напрямку інтелектуальних багатоканальних витратомірів, що дозволяє значно поліпшити їх метрологічні характеристики [47]. Другим напрямком розвитку методів вимірювання витрат є організація нестационарного енергетичного режиму у вимірювальній системі [47]. Як показує патентний пошук [48 – 50], зростає активність розробників у напрямку створення

пристроїв з частотно-часовими характеристиками, що дозволяє вдосконалити систему обробки інформації на базі мікропроцесорної техніки.

Новим напрямком у розробці радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів витрат є використання реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, що дозволяє створювати перетворювачі витрат з частотним виходом. Проблематика цих питань розглядається у даному розділі.

1.1 Перетворювачі витрат змінного перепаду тиску

Перетворювачами витрат змінного перепаду тиску називаються пристрої, дія яких основана на залежності перепаду тиску від витрат речовини, створюваного нерухливим пристроєм, встановлюваним у трубопроводі, або самим елементом трубопроводу [51, 52].

Розглянуті перетворювачі містять у собі, принаймні, три окремі частини:

1. Перетворювач витрат, що створює перепад тиску в залежності від витрат.

2. Сполучний пристрій, що передає перепад тиску від перетворювача до вимірювального приладу.

3. Диференціальний манометр, що вимірює перепад тиску, утворений перетворювачем витрат, і градуйований в одиницях витрат.

Якщо буде необхідність передати покази витратоміра на значну відстань, то до цих частин додаються ще три:

4. Вторинний перетворювач, який іноді називають датчиком, призначення якого є перетворення переміщення рухливого елемента первинного вимірювального приладу – дифманометра – в електричний або пневматичний сигнал, зручний для передачі.

5. Вторинна лінія зв'язку – електричні з'єднання або трубки, по яких здійснюється передача сигналу від вторинного перетворювача.

6. Вторинний вимірювальний прилад, що вимірює сигнал, створений вторинним перетворювачем, і градуйований в одиницях витрати.

Як первинний (дифманометр), так і вторинний вимірювальний прилади можуть бути самописними, інтегруючими і, крім того, обладнаними сигнальними і регулюючими пристроями.

Перетворювачі витрат змінного перепаду тиску підрозділяються на шість самостійних груп залежно від пристрою і принципу дії їхніх перетворювачів витрат:

1. Витратоміри із звужуючим пристроєм, основані на залежності від витрати перепаду тиску, що утвориться в звужуючому пристрої в результаті перетворення частини потенційної енергії потоку в кінетичну.

2. Витратоміри з гідравлічним опором, основані на залежності від витрат перепаду тиску, що утвориться на гідравлічному опорі.

3. Відцентрові витратоміри, основані на залежності від витрати перепаду тиску, що утвориться на закругленні трубопроводу в результаті дії відцентрової сили в потоці.

4. Витратоміри з напірним пристроєм, основані на залежності від витрати перепаду тиску, створюваного напірним пристроєм у результаті місцевого переходу кінетичної енергії струменя в потенційну.

5. Витратоміри з напірним підсилювачем, основані на залежності від перепаду тиску, створюваного напірним підсилювачем як у результаті переходу кінетичної енергії струменя в потенційну, так і в результаті часткового переходу потенційної енергії в кінетичну.

6. Струминні витратоміри, основані на залежності від витрат перепаду тиску, що утвориться при ударі струменя.

Отже, принципи дії перетворювачів витрат в кожній із перерахованих груп різні і тому всі ці перетворювачі повинні розглядатися самостійно. Але всі інші п'ять частин витратоміра: сполучний пристрій, дифманометр, вторинний перетворювач, вторинна лінія зв'язку і вторинний вимірювальний прилад є загальними для всіх перерахованих шести груп витратомірів.

Найбільш важливими серед всіх перерахованих приладів є витратомірами із звужуючими пристроями. Вони одержали винятково широке поширення і становлять не менш 70-80 % всіх витратомірів. Причинами цього є такі три переваги:

1. Універсальність застосування. Вони придатні для вимірювання витрат будь-яких однофазних середовищ та, у певній мірі, і двофазних. Крім того, вони придатні для вимірювання витрат будь-якої величини в трубках, практично, будь-якого діаметра і, практично, при будь-якому тиску і температурі.

2. Зручність масового виробництва. Індивідуально виготовляється тільки перетворювач витрат – звужуючий пристрій. Інші частини, в тому числі найбільш складні, дифманометр і вторинний прилад, можуть вигото-

влятися великими партіями. Їх будова не залежить ні від роду вимірюваного середовища, ні від величини витрат.

3. Відсутність необхідності в зразкових витратомірних установках у випадку застосування у якості перетворювачів витрат стандартних звужуючих пристроїв, встановлених у трубах, що мають діаметр не менше 50 мм [53].

Разом із цим витратоміри із звужуючим пристроєм мають і недоліки, з яких найбільш важливим є квадратична залежність між витратою і перепадом, наслідком чого є нерівномірність шкали, досить малий діапазон вимірювання, $Q_{\max} / Q_{\min} = 3 / 1$ і ускладнення, що виникають при застосуванні їх для вимірювання змінних витрат.

До числа їх інших недоліків можна віднести обмежені точність і швидкодію та наявність ртуті в деяких типах дифманометрів. Інерційність витратомірів зростає із збільшенням довжини трубок, що з'єднують звужуючий пристрій з дифманометром, а у випадку пневматичного вторинного перетворювача також і трубок, що з'єднують дифманометр із вторинним приладом. Похибка вимірювання витратомірів із звужуючими пристроями може лежати в досить широких межах залежно від стану звужуючого пристрою, діаметра трубопроводу, сталості тиску і температури вимірюваного середовища. У середньому граничну наведену похибку у них можна оцінити цифрами $\pm 1-3$ %.

Найпоширенішим звужуючим пристроєм є діафрагма, що представляє собою тонкий диск, із круглим отвором, вісь якого збігається з віссю труби.

Тоді рівняння для масового Q_M (кг/с) і об'ємної Q_V (м³/с) витрати приймають вигляд [36]

$$Q_M = \alpha \varepsilon S \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)}, \quad (1.1)$$

$$Q_V = \alpha \varepsilon S \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}, \quad (1.2)$$

де α – коефіцієнт витрат звужуючого пристрою, ε – коефіцієнт, що враховує стискаємість речовини, S – площа звужуючого отвору, ρ – густина речовини, $(p_1 - p_2)$ – перепад тиску.

Ці рівняння і є основними залежностями між витратою і перепадом для перетворювачів витрат із звужуючими пристроями. Вони придатні для будь-якого середовища – стискуваного і нестискуваного, в останньому випадку $\varepsilon = 1$.

1.2 Перетворювачі витрат з гідравлічним опором і відцентровим принципом дії

Крім звужуючих пристроїв у пристроях змінного перепаду тиску застосовуються ще і такі перетворювачі витрат: гідравлічні опори, відцентрові, напірні пристрої, напірні підсилювачі і струминні. У всіх цих перетворювачів за винятком гідравлічних опорів, що звичайно працюють у ламінарному режимі, має місце квадратична залежність між витратою і створеним перепадом тиску. Пристрій і принцип дії перерахованих перетворювачів різні, але працюючі з ними в комплекті вимірювальні прилади (дифманометри і вторинні прилади) ті самі [51].

Втрата тиску в гідравлічному опорі будь-якого типу залежить від витрати. Тому, вимірюючи перепад тиску, що існує по обидва боки гідравлічного опору, можна судити про витрату. Для практичних цілей знайшли застосування лише опори, що працюють в умовах ламінарного режиму. Їхньою істотною перевагою є можливість одержання лінійної залежності між витратою Q і перепадом Δp , якщо будуть виключені або істотно знижені ті частини перепаду, які пов'язані із втратами на вході в опори.

Основним типом опору, що забезпечує ламінарний режим руху, є одна або кілька капілярних трубок, включених паралельно. Перетворювачі з капілярними трубками зручні для вимірювання досить малих витрат рідин і газів, порядку десятків і сотень л/г і менше. Порівняно рідко при більш значних витратах застосовуються інші опори, наприклад, у вигляді скляних пористих дисків, пористого набивання з тонкої мідної стружки, що заповнює невелику ділянку трубопроводу між двома металевими сітками, або ж каліброваних металевих або скляних кульок, що також заповнюють цю ділянку труби. Як відомо, ламінарний рух у трубці має місце при числах $Re \leq 2300$. Звідси одержуємо залежність [57]

$$d_{\min} \geq 0,554 \cdot 10^{-3} Q_{\max} \rho / \mu,$$

з якої можна визначити максимальну об'ємну витрату (Q_{\max} для трубки заданого діаметра), або ж мінімально припустимий діаметр (d_{\min} трубки для заданої витрати).

На рис. 1.1 показана зміна потенційної і кінетичної енергій, а також втрат по довжині капілярної трубки при русі рідини. Відповідно до закону Пуазейля втрати від в'язкісного тертя Δp_n пропорційні довжині l трубки, відповідно до рівняння [36]

мати у витратомірі лінійну залежність між Q і Δp , то обидва отвори для відбору перепаду треба робити в межах ділянки l_2 . У більшості випадків, особливо при скляних капілярах, наприклад, у реометрах, тиск p_1 відбирається до, а тиск p_2 – після трубки. У цьому випадку загальний перепад тиску Δp буде визначатися величиною

$$\Delta p = \Delta p_l + \Delta p_y.$$

Тоді залежність Q від Δp при довгих капілярах буде наближатися до лінійного, а при коротких – до квадратичного. Якщо Δp_y мале у порівнянні з Δp_l , то визначити величину Δp_y , стосовно Δp_l , можна з наближеного рівняння [36]

$$\frac{\Delta p_y}{\Delta p_l} \approx \frac{\xi \rho d^4}{1024 \mu^2 l^2} \Delta p_l.$$

Щоб одержати шкалу приладу близьку до лінійної, потрібно мати довжину l в кілька сотень разів (200 – 300) більшу діаметра капіляра d . При $l = 18d$ рівняння вимірювання має вигляд [36]

$$Q \approx k \Delta p^{0,91}.$$

У випадку вимірювання витрат газу в капілярі відбувається додаткова втрата тиску Δp_p , пов'язана з поступовим зменшенням щільності газу і збільшенням середньої швидкості. Величина цієї втрати дорівнює $\Delta p_l / 2p_1$. Часто при малій величині цього відношення втратою Δp_p можна знехтувати. Розрахувати втрату тиску теоретичним шляхом для градування шкали не можна головним чином через неможливість виміряти із необхідною точністю діаметр капіляра, що входить у рівняння вимірювання в четвертому степені, тому капіляри повинні піддаватися індивідуальному градуванню.

Як ми вже відзначали, основне застосування капілярні перетворювачі мають для вимірювання малих витрат. Шляхом встановлення в трубопроводі пучка паралельних капілярів здійснюється вимірювання витрат рідини аж до 1500 – 2000 кг/г. Так, наприклад, для вимірювання витрат масла 1000 кг/г був застосований пакет з 963 сталевих трубок діаметром 0,48 мм і довжиною 150 мм. Через те, що в'язкість рідин істотно змінюється із темпе-

ратурою, вживають заходи для її компенсації або стабілізації. Найчастіше капілярний перетворювач витрати поміщають у водяний термостат.

У цій роботі розглядається застосування низки послідовно встановлених пористих шлакових перегородок. Завдяки обвідному трубопроводу можна було включати в основний потік будь-яке число із установлених послідовно чотирьох пластин. Це дозволило отримати дуже широкий діапазон вимірювання, що становив $0,8 - 100 \text{ см}^3/\text{с}$ при пористих перегородках зі скла і $15 - 450 \text{ см}^3/\text{с}$ – при бронзових пористих перегородках. Різні матеріали дають різні розміри пор у межах від 10 до 250 мкм. При більших розмірах лінійна залежність між витратою і перепадом порушується [57].

Розглянуті прилади мають у порівнянні з іншими витратомірами змінного перепаду тиску більший діапазон вимірювання і, крім того, краще підходять для вимірювання пульсуючих витрат, але розміри первинного перетворювача виходять більшими при значних витратах. Так, при вимірюванні пульсуючої витрати повітря, створюваної поршневым компресором $Q_{cp} = 85 \text{ м}^3/\text{г}$, один з перетворювачів складається із 175 паралельно розташованих алюмінієвих листів розміром $215 \times 152 \times 0,56 \text{ мм}$.

1.3 Перетворювачі витрат обтікання

Перетворювачами витрат обтікання називаються прилади, робота яких основана на залежності від витрати речовини переміщення тіла, що сприймає динамічний тиск потоку, що його обтікає.

Оскільки потік обмежений стінками трубопроводу, то умови обтікання тіла будуть істотно відмінними від умов обтікання такого ж тіла, зануреного у вільний потік. У більшості випадків між стінками труби і обтічним тілом залишається досить невеликий прохідний зазор, зазвичай кільцевої форми. У цьому зазорі створюється значна швидкість за рахунок відповідного падіння тиску, тому на занурене тіло крім динамічного тиску діє також і різниця статичних тисків [58].

Форми тіл обтікання різні: поплавець, поршень, куля, диск, крило, тощо. У більшості приладів тіло обтікання переміщується прямолінійно, зазвичай уздовж своєї вертикальної осі. В деяких приладах тіло повертається навколо осі підвісу. Величина переміщення або кута повороту є мірою витрати.

Характер роботи розглянутих витратомірів залежить від того, чи створюється протидіюча сила тільки вагою тіла або ж ще і іншим способом, наприклад, за допомогою пружини. Перетворювачі витрат системи обтікання класифікуються в такий спосіб [59]:

1. Витратоміри постійного перепаду тиску (тіло обтікання вільне): ротаметри; поплавкові; поршневі.

2. Витратоміри з перепадом, тиску, що змінюється (тіло обтікання вільне): поплавково-пружинні; поплавково-архімедові; кулькові з рухом у криволінійній трубці.

3. Витратоміри з поворотною лопатою: з вантажним урівноважуванням; із пружинним урівноважуванням; компенсаційні.

Схеми основних типів перетворювачів витрат обтікання показані на рис. 1.2. Ротаметр (рис. 1.2, а) являє собою конічну, звичайно скляну трубку, що розходить нагору, усередині якої переміщається поплавець. Шкала наноситься безпосередньо на скляній трубці. У поплавкового витратоміра (рис. 1.2, б) конічний поплавець переміщається в тонкому круглому отворі. Є і інші форми поплавців, наприклад, дисковий, що переміщається в конічному сидлі подібно зображеному на рис. 1.2, г. У поршневому витратомірі (рис. 1.2, в) обтічним тілом є поршень, що рухається всередині втулки, що має одне або кілька бічних отворів. Поплавкові і поршневі витратоміри звичайно забезпечуються електричним або пневматичним перетворювачем ходу поплавця або поршня. Зв'язок з перетворювачем виробляється за допомогою штока. Іноді кінець штока безпосередньо пов'язаний з відліковим пристроєм. Всі ці прилади основані на вимірюванні вертикального переміщення тіла, що змінює при цьому площу прохідного отвору, тому перепад тиску по обидві сторони поплавця залишається майже постійним.

Поплавково-пружинний витратомір з віссю, перпендикулярною до потоку, і вертикальним переміщенням поплавця зображений на рис. 1.2, г, а віссю, паралельною потоку, і горизонтальним переміщенням поплавця на рис. 1.2, д. У цих приладах, як, наприклад, на рис. 1.2, д, площа прохідного отвору може не змінюватися при переміщенні поплавця. У поплавково-архімедовому витратомірі роль пружини виконує архімедова сила – зміна гідростатичного тиску на тіло, пов'язане з поплавцем і частково занурене в більш важку рідину.

Кульковий витратомір показаний на рис. 1.2, е. У вигнутій по дузі кола, звичайно скляній трубці постійного перетину, під тиском потоку переміщується кулька. Протидіючою силою є проекція ваги кульки на вісь трубки. Перепад тиску в приладі пропорційний квадрату витрати [61, 62].

Схеми витратомірів з поворотною лопатою зображені на рис. 1.2, ж, з. У першому випадку площина лопати перпендикулярна до потоку, у другому – паралельна потоку. Зі збільшенням витрати лопата повертається на-

вколо осі підвісу. Кут повороту є мірою витрати. Протидіюча сила створюється вагою крила або деформацією пружини. Є також компенсаційні витратоміри, у яких тиск на лопату врівноважується постійною силою, наприклад, тиском стисненого повітря [63].

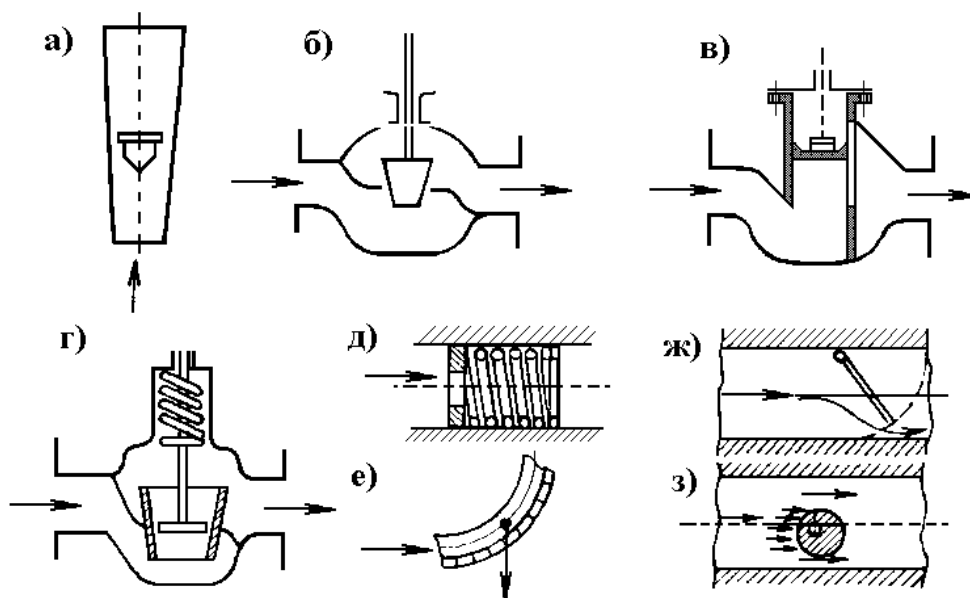


Рисунок 1.2 – Схеми перетворювачів витрат обтікання [36]

Із всіх перерахованих витратомірів обтікання найбільш широке поширення одержали ротаметри. Потім порівняно часто застосовуються поплавкові витратоміри і витратоміри з поворотною лопатою. Ротаметри застосовуються для вимірювання невеликих витрат рідини і газу, що мають незначний тиск. Витратоміри обтікання порівняно прості за будовою, надійні в роботі і мають діапазон вимірювання, що сягає до 8–10, а у витратомірів з поворотною лопатою – навіть 12–15. Наведена похибка більшості розглянутих приладів лежить у межах $\pm (1-2) \%$ [64].

1.4 Тахометричні перетворювачі витрат і лічильники кількості

Тахометричними перетворювачами називаються прилади і лічильники кількості, робота яких основана на залежності від витрати речовини швидкості руху тіла, встановленого в трубопроводі.

У переважній більшості випадків перетворювач витрати (турбінка, ротори, кулька тощо) під впливом потоку обертається. У порівняно рідких випадках його рухливий елемент робить поступальний, нутаційний або інший рух [65].

Залежно від пристрою перетворювача витрати тахометричні витратоміри поділяються на: а) турбінні, б) кулькові, в) камерні.

Якщо вал турбіни або іншого перетворювача витрати зв'язати через редуктор з рахунковим механізмом, то отримаємо вимірювач кількості – лічильник рідини або газу. Такі прилади широко застосовуються. Значно пізніше одержали поширення тахометричні витратоміри. У цьому випадку обов'язковою частиною приладу є тахометричний пристрій для вимірювання швидкості обертання рухливого елемента, що складається майже завжди із двох самостійних частин: тахометричного перетворювача швидкості обертання вала в частоту імпульсів, звичайно електричних, і вимірювача частоти цих імпульсів електричного аналогового або цифрового частотоміра. Якщо додатково мати електричний лічильник числа імпульсів, то одночасно отримаємо і вимірювач кількості.

Електричний тахометричний перетворювач майже не навантажує вал турбіни або іншого перетворювача витрати. Це сприяє істотному підвищенню точності вимірювання. Похибка вимірювання кількості, вимірюваного електричним лічильником, у цій схемі не перевищує $\pm 0,5\%$, у той час як у стандартних турбінних лічильників води (вал яких через редуктор зв'язаний з рахунковим механізмом) вона становить $\pm 2\%$, тобто в чотири рази більше. Крім того, відсутність механічного зв'язку з лічильником виключає необхідність у виводі осі турбіни через ущільнення, що, безсумнівно, підвищує надійність роботи приладу. Таким чином, сучасний тахометричний витратомір з лічильником складається із чотирьох елементів: а) перетворювача витрати (турбіни, кульки тощо); б) тахометричного перетворювача швидкості обертання турбіни або іншого елемента в частоту електричних імпульсів; в) електричного частотоміра; г) електричного лічильника.

Тахометричні лічильники (турбінні і камерні) займають основне місце серед приладів для вимірювання кількості рідини і газу. Широке поширення отримали також турбінні витратоміри для вимірювання витрати рідини. Вони виготовляються для труб діаметром від 4 до 750 мм для тисків до 250 МПа (2500 кгс/см^2) [66] і вище і для температур у діапазоні від -240 до $+700$ °С. Аналогічні прилади широко застосовуються для вимірювання витрати рідкого палива в транспортних установках. Останнім часом розширюється область застосування подібних приладів також у нафтовій, хі-

мічній і інших галузях промисловості. Перевагами розглянутих приладів є висока точність (особливо в камерних) і великий діапазон вимірювання.

Турбінні прилади застосовуються для вимірювання зміни кількості рідин. Для вимірювання витрати газу турбінні прилади застосовуються значно рідше. Це пов'язано з тим, що внаслідок малої щільності газу рушійний момент виходить незначним, незважаючи на порівняно великі швидкості. Це звужує діапазон вимірювання і підвищує поріг чутливості, а також вимагає прийняття особливих конструктивних заходів зі зниження опорів, що виникають при обертанні турбінок. Крім того, внаслідок великих швидкостей газу турбінок мають підвищену швидкість обертання, і значить – прискорене зношування підшипників.

Камерні тахометричні лічильники і витратоміри можуть застосовуватися для середовищ, що мають як велику, так і малу в'язкість. Камерні прилади поки що застосовуються, головним чином, як лічильники.

Кулькові прилади виникли пізніше турбінних і камерних. Вони застосовуються як витратоміри для вимірювання витрати різних рідин, головним чином води.

Тахометричні прилади вимірюють об'ємні витрату і кількість. При необхідності застосування їх для вимірювання масової витрати вони доповнюються пристроєм, наприклад, вимірювачем щільності, і необхідною лічильно-розв'язувальною схемою. Найбільш точними серед всіх розглянутих є деякі різновиди камерних приладів. Так, серійно виготовлені лічильники рідини з овальними шестірнями мають клас 0,5, незважаючи на механічний зв'язок з рахунковим механізмом [67].

Кулькові витратоміри менш точні в порівнянні з турбінними і мають менший лінійний діапазон вимірювання, але вони можуть працювати в забруднених середовищах. Турбінні і особливо камерні прилади дуже чутливі до забруднень і механічних домішок. Як показали випробування, навіть тверда вода негативно впливає на точність турбінних витратомірів. Крім того, для цих приладів досить важливою є здатність, що змазує, вимірюване середовище. Тому на нафтопродуктах вони краще працюють, ніж, наприклад, на воді. З цієї ж причини вони менш придатні для газів через швидке зношування підшипників. Істотним недоліком турбінних приладів є також залежність їхніх показників від в'язкості середовища. Із збільшенням в'язкості діапазон лінійної характеристики приладу істотно скорочується. Камерні прилади щодо цього кращі [68].

1.5 Теплові перетворювачі витрат

Теплові перетворювачі витрат працюють на основі вимірювання залежності від витрати ефекту теплового впливу (нагрівання або охолодження) на потік або на тіло, що контактує із потоком.

Донедавна теплові витратоміри поділялися як за принципом дії, так і за будовою тільки на калориметричні і термоанемометричні. У першому випадку вимірювалося підвищення температури потоку, що нагрівається, у другому – електричний опір нагрівної проволочки, або іншого термоанемометричного перетворювача, встановленого в потоці. В обох випадках нагрівання здійснювалося електричним струмом. Ці вже давно відомі прилади знайшли застосування головним чином при науково-дослідних і експериментально-виробничих роботах, причому переважно для вимірювання швидкостей і витрат газових потоків [69].

Тепер усе більш широке поширення отримують витратоміри із зовнішнім розташуванням нагрівача і термоперетворювачів. Вони виявилися дуже зручними як промислові прилади, особливо для вимірювання невеликих витрат рідин і газів. За принципом своєї дії ці прилади можуть бути підрозділені на квазікалориметричні і витратоміри приграничного теплового шару. Їхнім різновидом є прилади, у яких сама стінка труби виконує функції нагрівання і термоперетворення [70–73].

Далі починають з'являтися нові методи нагрівання, наприклад, за допомогою рідкого теплоносія, індукційний і інші, що істотно змінюють конструкцію витратоміра. За принципом дії ці прилади досить близькі до калориметричного.

Таким чином, з огляду на те, що теплові витратоміри поділяються за способом нагрівання, за розташуванням нагрівачів і термоперетворювачів усередині або зовні труби і за принципом дії, може бути запропонована така їх класифікація.

1. Витратоміри з електричним (омічним) нагріванням: 1) із внутрішнім нагріванням (контактні); а) калориметричні, б) термоанемометричні; 2) із зовнішнім нагріванням (неконтактні): а) теплового приграничного шару, б) квазікалориметричні із симетричним розташуванням термоперетворювачів; з несиметричним розташуванням термоперетворювачів; з нагрівною стінкою труби.

2. Витратоміри з індукційним нагріванням.

3. Витратоміри з нагріванням рідинним теплоносієм.

Діапазон витрат, охоплюваний тепловими витратомірами, дуже великий. Так, витратоміри із зовнішнім розташуванням нагрівача і термоперетворювачів придатні для труб, що мають діаметр, починаючи від 1,5–2 мм, а деякі їхні особливі різновиди: парціальні, точкові (з нагріванням обмеженої ділянки труби) і зондові можуть вимірювати витрати в трубах як завгодно великого діаметра. Наведена похибка неконтактних теплових витратомірів у середньому лежить у межах $\pm(1,5-3)$ %. У калориметричних контактних приладів вона може бути знижена до $\pm 0,5$ %. Теплові витратоміри вимірюють масову витрату [51].

Недоліком їх є значна інерційність. Виключенням є термоанемометри, які придатні для вимірювання швидкозмінних швидкостей і витрат.

Принципова схема калориметричного витратоміра показана на рис. 1.3,а. Усередині трубопроводу встановлені нагрівач 3 і два термоперетворювача 1 і 2 для вимірювання температури потоку T_1 до та T_2 після нагрівача. Звичайно термоперетворювачі 1 і 2 встановлюються на рівних відстанях $l_1 = l_2$ від нагрівача для того, щоб їх нагрівання за рахунок випромінювання було однаковим.

Розподіл температур по обидві сторони від нагрівача буде залежати від температури середовища, випромінювання нагрівача, втрати тепла в навколишній простір і швидкості потоку. Цей розподіл при постійній кількості тепла, що виділяється нагрівачем в одиницю часу, показане на рис. 1.3,б. Крива 1 відповідає відсутності витрати $Q_M = 0$; крива 2 має місце при досить незначній витраті, а крива 3 характерна для середніх і значних витрат. На кривій 1 температура майже за експоненціальним законом симетрично спадає в обидва боки від нагрівача. При $l_1 = l_2$ різниця температур $\Delta T = T_2 - T_1 = 0$. При виникненні витрати симетрія температурного поля порушується і виникає різниця температур ΔT у перерізах А–А і Б–Б. Спочатку при малих швидкостях потоку різниця температур ΔT_a (крива 2) росте з ростом витрати тому, що T_1 падає внаслідок надходження холодного газу або рідини, у той час як T_2 дуже мало змінюється або навіть злегка зростає, внаслідок зсуву температурного поля у бік перерізу Б–Б. Потім при подальшому зростанні витрати температура T_1 прийме постійне значення, рівне температурі вступника газу (крива 3), а температура T_2 буде падати, тому що підвищення температури потоку в нагрівачі буде обернено пропорційне його витраті Q_M . Отже, різниця температур ΔT_b буде зменшуватись із ростом витрати.

ЛІТЕРАТУРА

1. Викулин И. М. Полупроводниковые датчики / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Советское радио, 1975. – 104 с.
2. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М. : Радио и связь, 1990. – 263 с.
3. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / За ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 1. – 2002. – 475 с.
4. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / За ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 2. – 2003. – 592 с.
5. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / За ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 3. Книга 1. – 2007. – 246 с.
6. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: навчальний посібник / За ред. З. Ю. Готри. – Львів : Ліга-Прес. – Т. 3. Книга 2. – 2007. – 364 с.
7. Кошовий М. Д. Пристрої та системи для вимірювання тиску / М. Д. Кошовий, Т. Г. Рожнова // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2005. – № 3. – С. 157–158.
8. Построение информационно-измерительных систем с коммутацией каналов / [М. Д. Кошовий, А. Г. Михайлив, А. С. Кулик, Т. Г. Рожнова] // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – Т. 2. – Вип. 19. – С. 141–145.
9. Костенко В. Л. Исследование твердотельных структур для датчиков специализированных информационно-измерительных систем / В. Л. Костенко, Р. В. Нягу // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – С. 185–187.
10. Кухарчук В. В. Елементи контролю динамічних параметрів електронних машин / Василь Васильович Кухарчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1998. – 127 с.
11. Манойлов В. Ф. Неинвазивный метод определения вязкостных свойств крови по параметрам пульсовой волны / В. Ф. Манойлов, Т. Н. Никитчук // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии. 15-я международная Крымская конференция. – Севастополь, 12–16 сентября 2005 г. – Севастополь : Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 902–903.
12. Скрипник Ю. О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НДЧ-діапазону / Ю. О. Скрипник, В. Ф. Манойлов, О. П. Яненко. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.

13. Вимірювання температури: теорія та практика / [Луцик А. Т. Гук О. П., Лах О. І., Стадник Б. І.]. – Львів : Бескід БІТ, 2006. – 559 с.
14. Енциклопедія термометрії / [Луцик А. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І.]. – Лівів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 414 с.
15. Осадчук В. С. Индуктивный эффект в полупроводниковых приборах / Владимир Степанович Осадчук. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.
16. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 275 с.
17. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. Г. Вербицький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2001. – 195 с.
18. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 208 с.
19. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2005. – 207 с.
20. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – 162 с.
21. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением / Александр Владимирович Осадчук. – Винница : Континент, 1998. – 129 с.
22. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / Олександр Володимирович Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2000. – 302 с.
23. Пістун Е. П., Лесовой Л. В. Нормування витрат змінного перепаду тиску / Е. П. Пістун, Л. В. Лесовой. – Львів : Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв, 2006. – 570 с.
24. Поджаренко В. О. Оцінка статистичних метрологічних характеристик опосередкованих вимірювань / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук // Вісник державного університету «Львівська політехніка». Автоматика, вимірювання та керування. – 2001. – № 420. – С. 37–47.
25. Бабичев Г. Г. Вертикальный двухколлекторный транзистор с ускоряющими электронными полями в базе и эмиттере / Г. Г. Бабичев,

С. И. Козловский, В. А. Романов // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 3. – С.370–379.

26. Кремниевый однопереходной тензотранзистор / [Г. Г. Бабичев, С. И. Козловский, В. А. Романов, Н. Н. Шаран] // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 2. – С. 66–71.

27. Скрипник Ю. А. Частотно-дисперсійні аналізатори складу та властивостей матеріалів та речовин / Ю. А. Скрипник, Д. Б. Головка, К. Л. Шевченко. – Київ : МП ЛЕСЯ, 2002. – 182 с.

28. Скрипник Ю. А. Методи і засади частотно-дисперсійного аналізу речовин та матеріалів / Ю. А. Скрипник, Д. Б. Головка. – Київ : Фаза – ЛТД, 2000. – 198с.

29. Шарапов В. М. Трехкоординатный пьезоэлектрический акселерометр / В. М. Шарапов, А. Н. Гурский, Н. Ю. Плосконос // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2007. – Спецвипуск. – С. 258–260.

30. Шарапов В. М. Симметричный биморфный пьезокерамический преобразователь с линейной амплитудно-частотной характеристикой / В. М. Шарапов, Ю. Ю. Балковская // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2002. – № 3. – С. 43–46.

31. Арутюнян В. М. Микроэлектронные технологии – магистральный путь для создания химических твердотельных сенсоров / В. М. Арутюнян // Микроэлектроника. – 1991. – № 4. – С. 337–355.

32. Аш Ж. Датчики измерительных систем. В 2-х томах / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. –Т. 1. – 424 с.

33. Бутурлин А. Н. Микроэлектронные датчики влажности. Сборник обзоров / А. Н. Бутурлин, С. А. Крутоверцев, Ю. Д. Чистяков // Зарубежная электроника. – 1984. – № 9. – С. 3–54.

34. Бутурлин А. Н. Влияние режимов получения на структуры пироли- тических пленок оксида олова и на их газочувствительные свойства / А. Н. Бутурлин, Т. А. Габузян, Н. А. Голованов // Полупроводниковые ма- териалы. Сб. научн. тр. –М. : МИЭТ. – 1984. – С. 95–98.

35. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб. – М. : Мир, 1989. – 196 с.

36. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение, 1975. – 776 с.

37. Кремлевский П. П. Расчет и конструирование расходомеров / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностроение, 1978. – 224 с.

38. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 424 с.
39. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 684 с.
40. Измерение параметров цифровых интегральных микросхем / [Под ред. чл.-корр. АН Литовской ССР Д. Ю. Эйдукаса и канд. техн. наук Б. В. Орлова]. – М. : Радио и связь, 1982. – 367с.
41. Філінюк М. А. Аналіз впливу зворотнього зв'язку на параметри негatronу на польовому транзисторі / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 6. – С. 94–97.
42. Филинюк Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления «Негатроника» / Николай Филинюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 3. – С. 38–43.
43. Філінюк М. А. Дослідження енергетичних властивостей нелінійної індуктивності / М. А. Філінюк, О. О. Лазарєв // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 44–46.
44. Кичак В. М. Радиоимпульсные логические НВЧ элементы / Василь Кичак. – Вінниця : УНВІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 249 с.
45. Chu F. Chemische sensoren Grundlagen / F. Chu, K. Zucholl // Trends und Anwendungen. Technische Rundschau. – 1988. – № 42. – P. 154–159.
46. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. – М. : Советское радио, 1980. – 230 с.
47. Ющенко Ю. А. Огляд сучасного стану вимірювання витрат речовини на основі теплових методів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції: «Перспективні напрямки науки і техніки - 2007», 16-30 листопада 2007, м. Пшемишль, 2007. Польща. – С.74–79.
48. А.с. 1809313. СССР. МКИ G01 F 3/16. Устройство для измерения расхода жидкости / Б. Н. Ковальский, А. Л. Гайдуков (СССР). – № 4935409/10; заявлено 12.05.1990; опубликовано 15.04.1993; бюл. №14.
49. Пат. 15311 Україна, МКІ G01 F 1/00. Витратомір палива / М. Д. Кошовий, В. П. Сіроклин, В. А. Дергачов, М. Ю. Іванцов (Україна). – № 200600393; заявлено 16.01.2006; опубліковано 15.06.2006; бюл. № 6.

50. Пат. 15903 Україна, МКІ G01F 3/00. Пристрій для вимірювання витрати палива рідини / М. Д. Кошовий, М. Ю. Іванцов, В. П. Сіроклин, В. А. Дергачов (Україна). – №200606716; заявлено 16.06.2006; опубліковано 15.11.2006; бюл. № 11.

51. Пат. 4478076 США, МКІ G 01 F1/68. Flow sensor / Philip J Voches (США); Honeywell, Inc. – № 431537; заявлено 30.09.1982; опубліковано 23.10.1984; НКІ 73/204.

52. Кремлевский П. П. Технология и классификация приборов для измерения расходов и количеств / П. П. Кремлевский // Измерительная техника. – 1988. – № 11. – С. 19–21.

53. Kimura M. Microheater and Microbolometer using Microbrige of SiO₂ Film on Silicon / M. Kimura // Electronics letters. – 1981. – Vol. 17. – №2. – P. 80–82.

54. Каханович В. С. Выбор оптимального модуля сужающего устройства и повышения точности измерения расходов / В. С. Каханович, Р. А. Калько // Измерительная техника. – 1971. – № 5. – С. 38–40.

55. Каплан М. Б. Новая конструкция установки сужающих устройств расходомеров / М. Б. Каплан // Измерительная техника. – 1986. – № 1. – С. 46–49.

56. Вайнштейн А. Л. К вопросу об измерении расхода вязких сред / А. Л. Вайнштейн // Измерительная техника. – 1989. – № 1. – С. 58–62.

57. Пат. 2002 /0043710A1 США, МКІ Н 01L 23/48. Flow sensor in a housing / Felix Mayer, Marc R. Hornung (CH). – № 09931511; заявлено 16.08.2001; опубліковано 18.04.2002.

58. Пат. 2004/0025585 A1 США, МКІ G 01 F1/68. Flow sensor and method of manufacturing the same / Koji Seki, Nobuhiko Zushji Kamiunten. – № 101434563; заявлено 9.05.2003; опубліковано 12.02.2004.

59. Пат. 6349596B1 США, МКІ G 01 F1/68. Thermal type air flow sensor / Kelichi Nakada, Igumi Wakanabe, Hiroshi Yoneda. – № 09461190; заявлено 15.12.1999; опубліковано 26.02.2002.

60. А.с. 1597561 СССР, МКІ G 01 F1/20. Расходомер жидкости и газа / В. В. Дутчак, В. Л. Чумаков. – № 445528424–10; заявлено 05.07.88; опубліковано 07.10.90; бюл. № 37.

61. Таршин М. С. Ротаметр повышенной чувствительности / М. С. Таршин // Измерительная техника. – 1985. – № 4. – С. 39–42.

62. Улечко Д. Н. Симметричный расходомер постоянного перепада / Д. Н. Улечко // Измерительная техника. – 1980. – № 9. – С. 56–57.
63. Пат. 6382014В1 США, МКІ G 01 15/00. Real time on road vehicle exhaust gas modular flow metter and emissions reporting system / Leo Alphonse Gerard Breton. – № 09685946; заявлено 12.10.2000; опубликовано 07.05.2002.
64. Бошняк Л. Л. Практический метод градуирования ротаметров / Л. Л. Бошняк // Измерительная техника. – 1983. – № 7. – С. 46–50.
65. Атабеков Н. Г. Счетчики жидкости ковшового типа / Н. Г. Атабеков, Л. А. Арутюнов, Э. Р. Цабкевич // Нефтяное хозяйство. – 1975. – № 9. – С. 54–58.
66. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие / [Н. Н. Евтихеев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский, В. Н. Скугоров. Под общей редакцией академика Н. Н. Евтихеева]. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 350 с.
67. Утямышев Р. Н. Электронный измеритель расхода топлива с ненагруженной вертушкой / Р. Н. Утямышев // Приборостроение. – 1959. – № 2. – С. 29–30.
68. Шонин Л. Н. Промышленное применение скоростных шариковых расходомеров / Л. Н. Шонин, Ю. А. Комаров // Труды НИИ теплоприборостроения. – 1966. – № 1. – С. 70–82.
69. Перспективы теплоанемометрических методов измерения расхода газа или жидкости / [М. А. Ураксеев, А. Ф. Романченко, Д. Р. Абрашитова, С. А. Шилов] // Электронный журнал «Исследовано в России». – С. 587–593. <http://zhurnal.ape.relarm.rularticles/2001/051.pdf>.
70. А.с. 1137304 СССР, МКІ G 01 1/00. Способ измерения расхода / В. Б. Эткин, М. Я. Метро, А. С. Перевердиев, Г. Б. Рабинович (СССР). – № 3632310/24–10; заявлено 04.08.83; опубликовано 30.01.85; бюл. № 4.
71. А.с. 1161826 СССР, МКІ G 01 F 1/66. Тепловой расходомер / С. И. Артюх, В. Х. Галюк, С. Н. Постников, Ю. Д. Седов (СССР). – № 3687590/24–10; заявлено 16.11.83; опубликовано 15.06.85; бюл. № 22.
72. А.с. 1190197 МКІ G 01 F 1/00. Тепловой расходомер / А. М. Зингер, С. А. Баранов, Г. П. Виноградов (СССР). – № 3714114/24–10; заявлено 23.03.84; опубликовано 07.11.85; бюл. № 41.

73. Александрович Г. В. Тепловой трубчатый расходомер / Г. В. Александрович, В. Н. Колесов // Заводская лаборатория. – 1967. – № 3. – С. 380–382.
74. Пат. 6446504В1 США, МКИ G 01 F1/68. Constant temperature gradient differential thermal mass flow sensor / Thomas O. Maginnis, Ir. Dracut. – № 09539109; заявлено 30.03.2000; опубликовано 10.09.2002.
75. Игумнов Н. Н. Термопреобразователь скорости потока / Н. Н. Игумнов // Измерительная техника. – 1986. – № 6. – С. 76–78.
76. Коротков П. А. Неконтактные расходомеры с полупроводниковым нагревателем / П. А. Коротков, Д. В. Беляев, Я. Б. Рукин // Известия вузов. Приборостроение. – 1965. – № 4. – С. 123–126.
77. Опыт изготовления первичных преобразователей неконтактных расходомеров / [Н. В. Долецкий, М. А. Новоселова, Д. В. Беляев, З. А. Шишкин] // Приборы и системы управления. – 1973. – № 11. – С. 46–47.
78. Пат. 2277699 Российской Федерации, МКИ G 01 F 1/00. Электромагнитный датчик расхода / Пасечник Н. В., Сивак Б. А., Прохоров А. В., Коптев В. С., Грачев В. Г., Солодовник Ф. С. (RU). – № 20041381–10; заявлено 27.12.04; опубликовано 10.06.2006.
79. А.с. 1117449 СССР, МКИ G 01 F 1/58. Электромагнитный расходомер с частотным выходом / А. А. Вирбалис, Б. Н. Кришчюнас (СССР). – № 3649803/24–10; заявлено 04.10.83; опубликовано 07.10.84; бюл. № 37.
80. А.с. 1159398 СССР, МКИ G 01 F 1/56. Бесконтактный измеритель расхода жидких металлов / В. Н. Типикин, Б. В. Кебадзе, М. Н. Арнольд, В. П. Козлов (СССР). – № 3225592/24–10; заявлено 29.12.80; опубликовано 23.08.88; бюл. №31.
81. А.с. 1012026 СССР, МКИ G 01 F 1/58. Электромагнитный расходомер с частотным выходом / А. А. Вирбалис, С. С. Берташюс, А. П. Радшюнас, Р. С. Вайкакас (СССР). – № 3313088/18–10; заявлено 09.07.81; опубликовано 15.04.83; бюл. №14.
82. А.с. 1015252 СССР, МКИ G 01 F 1/58. Электромагнитный расходомер с частотным выходом / В. Л. Вирбалене, П. И. Мицкунене, Б. Н. Кришчунас (СССР). – № 3229772/18 – 10; заявлено 04.01.81; опубликовано 30.04.83; бюл. №16.

83. Корсунский Л. М. Развитие электромагнитных расходомеров / Л. М. Корсунский // Приборы и системы управления. – 1972. – № 9. – С. 28–31.
84. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М. : Госэнергоиздат, 1956. – 390 с.
85. Абрикосов А. А. Основы теории металлов / А. А. Абрикосов. – М. : Наука, 1987. – 519 с.
86. Красильникова В. В. Моделирования тепловых режимов интегральных теплопреобразователей / В. В. Красильникова. // Приборы и системы управления. – 1991. – № 7. – С. 16–17.
87. Осадчук В. С. Дослідження теплових режимів мікроелектронного частотного перетворювача магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. Г. Яровенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 3. – С. 47 – 51.
88. А.с. 1675908 СССР, МКИ G 06 F 15/46. Способ теплового контроля качества объемных интегральных схем / Осадчук В. С., Паламарчук Е. А., Стронский В. В., Яровенко А. Г. (СССР). – № 4617305/24; заявлено 06.12.88; опубликовано 07.09.91; бюл. № 33.
89. Осадчук В. С. Математична модель температурного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 3. – С. 47–51.
90. Березин А. С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А. С. Березин, О. Ф. Мочалкина. – М. : Радио и связь, 1983. – 231 с.
91. Беляев Н. М. Термодинамика: Учебное пособие / Н. М. Беляев – К. : Вища школа, 1987. – 343 с.
92. Смирнов М. М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка / М. М. Смирнов. – М. : Наука, 1964. – 206 с.
93. Бронштейн Н. Н. Справочник по математике / Н. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 718 с.
94. Потемкин В. Г. Система научных расчетов. В двух томах. Matlab 5.x. Том 1 / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог – МИФИ, 1999. – 366 с.
95. Осадчук В. С. Методы построения микроэлектронных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы /

В. С. Осадчук, А. В. Осадчук // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2004. – № 3. – С. 26–33.

96. Осадчук В. С. Фотореактивный эффект в транзисторах со структурой металл-диэлектрик-полупроводник / В. С. Осадчук, С. И. Одобецкий // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34, – № 11. – С. 2387–2393.

97. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / [Под ред. Н. В. Мальского, Б. В. Сестрорецкого]. – М. : Советское радио, 1969. – 579 с.

98. Осадчук О. В. Дослідження параметрів генераторів на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – № 2. – С. 55–60.

99. Ко W. H. Designing tunnel diode oscillators / Ко W. H. // Electronics. – 1961. – Vol. 34, – № 6. – P. 68–72.

100. Семеновський В. К. Время переключения туннельного диода при запуске наклонным фронтом напряжения / В. К. Семеновський // Радиотехника и электроника. – 1962. – Т. 7, – № 12. – С. 2092–2094.

101. Малышев В. А. Об аппроксимации вольтамперной характеристики туннельного промежутка полиномами для квазилинейного анализа особенностей его работы / В. А. Малышев // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т. 10, – №9. – С. 1635–1638.

102. Сидоров А. С. Теория и проектирование нелинейных импульсных схем на туннельных диодах / А. С. Сидоров. – М. : Советское радио, 1971. – 262 с.

103. Микроэлектронные устройства СВЧ. Учебное пособие. [Под редакцией проф. Г. П. Веселова]. – М. : Высшая школа, 1988. – 280 с.

104. Баркан В. Ф. Проектирование радиотехнических устройств / В. Ф. Баркан, В. К. Жданов. – М. : Оборонгиз, 1963. – 515 с.

105. Стабильность частоты генератора на туннельном диоде при изменении питающего напряжения. Полупроводниковые приборы и их применение / [Кемпе Ф., Попов Н. А.]; Под ред. Я. А. Федотова. – Вып. 11, 1964. – С. 208–206.

106. Бенинг Ф. Отрицательное сопротивление в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М. : Советское радио, 1975. – 286 с.

107. Пат. 34249А Україна, МКІ Н03В 7/00. Напівпровідниковий генератор електричних коливань / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ковальчук О. М., Семеренко М. М. – № 99063411; заявлено 18.06.1999; опубліковано 15.02.2001; бюл. №1.
108. Пат. 24375 Україна, МКІ Н03В 7/00. Електрично керований генератор гармонійних коливань / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Осадчук Є. В. – № 97041546; заявлено 02.04.97; опубліковано 17.07.98.
109. Осадчук В. С. Аналіз роботи генератора на основі транзисторної структури з від'ємним опором / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 4. – С. 97–103.
110. Пат. 24002 Україна. МКІ G 01 F 1/34. Витратомір газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. – № U200702067; заявлено 26.02.2007; опубліковано 11.06.2007; бюл. №8.
111. Пат. 24005 Україна. МКІ G 01 F 1/34. Мікроелектронний вимірювач витрати газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. – № U200702076; заявлено 26.02.2007; опубліковано 11.06.2007; бюл. №8.
112. Пат. 26479 Україна. МКІ G 01 F 1/34. Мікроелектронний пристрій для виміру витрат газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А., Ярославцев О. О. – № U200704955; заявлено 03.05.2007; опубліковано 25.09.2007; бюл. №15.
113. Пат. 29964 Україна МКІ G01F 1/34. Мікроелектронний витратомір газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А., Ярославцев О. О. – № U200704522; заявлено 23.04.2007; опубліковано 11.02.2008; бюл. №2.
114. Разевиг В. Д. Применение программ P-САД и Pspise для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2: Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 64 с.
115. Ющенко Ю. А. Радіовимірювальний пристрій витрат газу / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Ю. А. Ющенко // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективні інновації в науці, освіті і транспорті. – Одеса, 20-30 червня 2008. – С. 26–30.
116. Мікроелектронний частотний витратомір на основі біполярного і польового транзисторів / [Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А., Ярославцев О. О.] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 3. – С. 173–175.

117. Ющенко Ю. А. Тепловий частотний витратомір газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікації та приладобудування» (СПРТП-2007). м. Вінниця, 31 травня–2 червня 2007 року. – С. 50–52.
118. Ющенко Ю. А. Тепловий витратомір на основі транзисторної структури з від'ємним опором / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – 2007. – С.221–223.
119. Ющенко Ю. А. Радіовимірювальний перетворювач витрат газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Тези Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2008». – Гурзуф, 2008. 22-24 вересня 2008. – С.95–96.
120. Yushenko Y. A. Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with the negative resistance / Osadchuk V. S., Osadchuk A. V., Yushenko Y. A. // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologia. – 2008. – № 4 (84). – С. 89–93.
121. Ющенко Ю. А. Вольт-амперна характеристика витратоміра газу з активним індуктивним елементом / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Наука і технологія – крок у майбутнє –2008», 1-15 березня 2008. – Прага, 2008. Чехія. – С. 58–63.
122. Радіовимірювальний тепловий витратомір з частотним виходом / [Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А., Ярославцев О. О.] // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – № 2 (12). – С. 12–18.
123. Ющенко Ю. А. Мікроелектронний витратомір на основі транзисторної структури з активним індуктивним елементом / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 7. – С.89–92.
124. Ющенко Ю. А. Мікроелектронний радіовимірювальний тепловий витратомір газу / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ющенко Ю. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 88–93.
125. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. –М. : Радио связь, 1986. – 440 с.

126. Дементьев Ю. В. Семейство микроконтролерів MCS – 51: навчальний посібник / Ю. В. Дементьев. – Вінниця : ВДТУ. – 1998. – 99 с.
127. Шагурин Н. Н. Микропроцессоры и микроконтроллеры фирмы Motorola. Справочное пособие / Н. Н. Шагурин. – М. : Радио и связь, 1998. – 560 с.
128. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебное пособие / [Под ред. В. Н. Нефедова]. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.
129. Поджаренко В. О. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка. Навчальний. посібник / В. О. Поджаренко, В. В. Кухарчук. – Київ : НВК ВО, 2001. – 240 с.
130. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо [Перевод с испанского С. И. Баскакова. Под ред. В. А. Терехова]. – М. : Высшая школа, 1991. – 351 с.
131. Электрические измерения. Учебное пособие. Изд. 4-е / [Под ред. А. В. Фремке]. – Л. : Энергия, 1973. – 424 с.
132. Кухарчук В. В. Аналіз та практична реалізація мікропроцесорного засобу вимірювання кутової швидкості обертання електричних машин / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1995. – № 2. – С. 12–16.
133. Анализ измерительных информационных систем / [Маликов В. Т., Дубовой В. М., Кветный Р. Н., Исмагулаев П. Р.]. – Ташкент : ФАМ, 1984. – 176 с.
134. Кузьмин И. В. Оценка эффективности и оптимизации АСКУ / Иван Васильевич Кузьмин. – М. : Советское радио, 1971. – 294 с.
135. Байковский В. М. Некоторые аспекты информационного обеспечения управления новой техникой. Сб. «Методические материалы по подготовке докладов о важнейших движениях приборостроения» / В. М. Байковский, Т. В. Кашуба. – М. : Из-во ЦНТИ приборостроения, 1977. – С. 1–38.
136. Осадчук О. В. Математична модель температурного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 1999. – № 3. – С. 81–86.
137. Проектирование датчиков для измерения механических величин / [Под. ред. Е. П. Осадчого]. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

Наукове видання

**Осадчук Володимир Степанович
Осадчук Олександр Володимирович
Ющенко Юрій Андрійович**

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВИТРАТ ГАЗУ
З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготовлено О. В. Осадчуком

Підписано до друку 01.10.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 8,08
Наклад 100 прим. Зам № 2012-151

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.