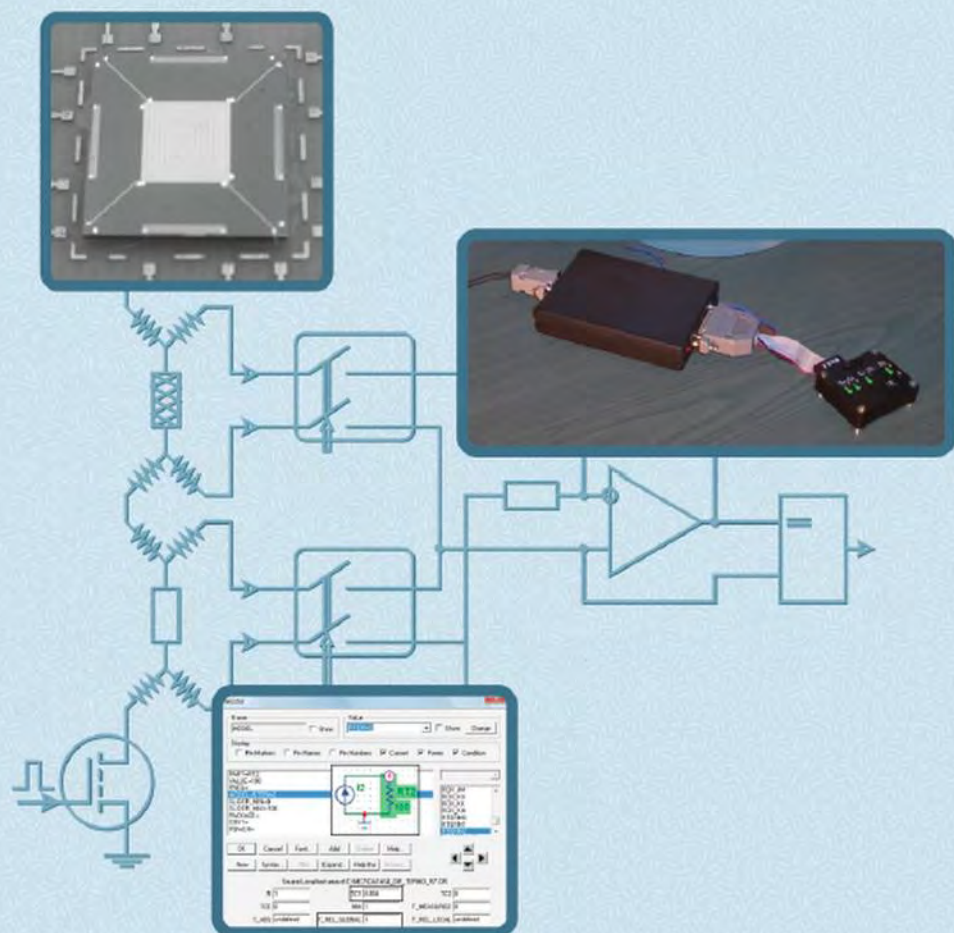


МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИГНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ



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

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИГНАЛЬНІ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ**

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 681.586: 621.382
ББК 32.96-04:32.844.1
М59

Автори:

**З. Ю. Готра, С. В. Павлов, Р. Л. Голяка, В. Вуйцик,
О. В. Осадчук, С. С. Куленко**

Рецензенти:

О. Д. Азаров, доктор технічних наук, професор

З. М. Микитюк, доктор фізико-математичних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 4 від 25 листопада 2010 р.)

Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку : монографія / З. Ю. Готра, С. В. Павлов, Р. Л. Голяка та ін. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 240 с.

ISBN 978-966-641-500-7

В монографії розглядаються наукові проблеми розробки інтегральних сигнальних перетворювачів для мікроелектронних теплових сенсорів потоку біомедичного призначення, зокрема, в пристроях вимірювання параметрів дихальної системи, біохімічного аналізу, технологічних процесах фармакології тощо. Пропонуються нові підходи до їх електротеплового моделювання та запропоновано низку сигнальних перетворювачів теплових сенсорів потоку, що базуються на новітній мікроелектронній елементній базі.

Монографія розрахована на фахівців, які працюють в галузі мікроелектроніки, а також може бути корисною студентам і аспірантам відповідного спрямування.

**УДК 681.586: 621.382
ББК 32.96-04:32.844.1**

ISBN 978-966-641-500-7

©З.Готра, С. Павлов, Р. Голяка, В. Вуйцик, О. Осадчук, С. Куленко, 2012

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СЕНСОРІВ ПОТОКУ ЗАГАЛЬНОГО ТА БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	7
1.1. Аналіз стану розвитку теплових сенсорів потоку загального та біомедичного призначення	7
1.2. Особливості теплового розрахунку теплових сенсорів потоку загального та біомедичного призначення.....	19
1.3. Тенденції розвитку інтегральних сигнальних перетворювачів сенсорних пристроїв.....	28
1.4. Аналіз інтегральних сигнальних перетворювачів мікроелектронних теплових сенсорів потоку загального та біомедичного застосування.....	30
1.5. Особливості температурного розподілу в біомедичних об'єктах	40
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ЕЛЕКТРОТЕПЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРВИННИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ.....	44
2.1. Математична модель теплового поля інтегральної структури	45
2.2. Електротеплове моделювання вимірювальних перетворювачів в імпульсних режимах роботи.....	53
2.3. Електротеплове моделювання температурно-залежних вольт-амперних характеристик резистивних перетворювачів.....	62
2.4. Електротеплове моделювання температурно-залежних ВАХ перетворювачів діодного типу.....	73
2.5. Електротеплове моделювання температурно-залежних ВАХ перетворювачів транзисторного типу	78
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КІЛ ПЕРВИННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ.....	84
3.1. Вимірювальні кола одинарних інтегрованих резистивних перетворювачів.....	84
3.2. Вимірювальні кола диференційних інтегрованих резистивних перетворювачів.....	94

3.3. Вимірювальні кола диференційних сенсорів температури.....	105
РОЗДІЛ 4. СХЕМОТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	122
4.1. Рекомендації щодо побудови контролерів температурного режиму	123
4.2. Схемотехнічна реалізація диференціального термометра	145
4.3. Практична реалізація сигнальних перетворювачів теплових сенсорів потоку біомедичного призначення.....	152
РОЗДІЛ 5. ЧАСТОТНІ ПЕРВИННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР.....	165
5.1. Резонансні первинні вимірювальні перетворювачі.....	155
5.2. Обґрунтування методики розрахунку автогенераторних вимірювальних перетворювачів на основі методу Ляпунова.....	168
5.3. Розрахунок перетворювачів температури з резонансним контуром на основі двозатворного МДН-транзистора...	169
5.4. Перетворювачі температури на основі МДН-транзисторних структур.....	176
5.5. Напівпровідникові вимірювачі температури на основі двох МДН-транзисторів.....	183
5.6. Частотні перетворювачі температури на основі біполярних транзисторів.....	197
5.7. Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з термоопором.....	207
5.8. Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом....	211
ПІДСУМКИ.....	217
ЛІТЕРАТУРА.....	219
ДОДАТКИ.....	229

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	аналого-цифровий перетворювач
БІ	біомедична інформація
ВП	вимірювальний перетворювач
ІЧ	інфрачервоний
МП	мікропроцесор
ПЗ	програмне забезпечення
СП	сенсор потоку
ТА	термоанемометр
ISFET	Ion Selective Field Effect Transistor
LTCC	Low Temperature Coffered Ceramics
MEMS	Micro-Electromechanical Systems

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасної діагностичної апаратури біомедичного призначення характеризується стрімким розширенням фізичних методів вимірювального перетворення функціональних можливостей, підвищенням технічних характеристик, широким впровадженням мікроелектронних технологій та мікропроцесорної техніки. Ці тенденції яскраво проявляються в одному з важливих класів діагностичної апаратури – пристроях вимірювання швидкості потоку газів та рідин (сенсорах потоку), що застосовуються для вимірювання параметрів дихальної системи (зокрема, при астматичних захворюваннях), в системах штучного дихання, засобах біохімічного аналізу. Крім того, сенсори потоку знаходять широке застосування в технологічних процесах фармакології та пристроях екологічного моніторингу.

З точки зору біохімічної сумісності матеріалів, високої надійності функціонування, мінімального впливу на параметри досліджуваного потоку та можливості вимірювати як малі, так і великі потоки рідин та газів пріоритетність в біомедичній апаратурі мають теплові сенсори потоку (термоанемометри, *thermal flow sensors, hot-wire anemometer*) – пристрої, вимірювальна здатність яких базується на визначенні температурного поля в локально нагрітій речовині потоку.

Розвитку наукового напрямку сигнальних перетворювачів теплових сенсорів потоку загального та біомедичного призначення потрібно завдячити, насамперед, видатним науковцям, відомих вітчизняної та зарубіжної шкіл: З. Ю. Готри, В. С. Осадчука, О. В. Осадчука, О. Д. Азарова, Р. Л. Голяки, В. С. Гутнікова, а також Allen B. Holmes, Richard Miller, David W. Spitzer, N. T. Nguyen, D. Lee та ін.

Актуальність проблеми розробки нового покоління інтегральних сигнальних перетворювачів для мікроелектронних теплових сенсорів потоку обумовлена декількома факторами. По-перше, структурно-схемні рішення, що застосовуються в традиційних сигнальних перетворювачах, зокрема, для вимірювальних кіл терморезистивного типу, не забезпечують вимог щодо мінімізації енерговитрат мікроелектронних теплових сенсорів потоку. По-друге, з переходом на низьковольтні джерела живлення набуває особливої важливості мінімізація паразитного впливу на результат вимірювання опорів ліній передач сигналу. По-третє, в процесі розробки сенсорних пристроїв вимірювання швидкості потоку повинні враховуватися всі вимоги щодо їх відповідності сучасним напрямкам розвитку мікроелектронних сенсорів, зокрема, інтерфейсна сумісність, можливість програмного керування процесом вимірювання, розширені функціональні можливості, відповідність стандарту до інтелектуальних сенсорів IEEE1451.2 Intelligent Sensors, відповідність вимогам до техніки біомедичного призначення тощо.

Тому, принципово важливою є реалізація отриманих в роботі підходів на сучасній елементній базі, зокрема, інтегральних високопрецизійних CMOS rail-to-rail операційних підсилювачах, двонаправлених мультиплексорах типу ADG, мікроконвертерах типу ADuC, потужних D-MOS HEX FET транзисторах тощо. Таким чином, задача розробки сучасних інтегральних сигнальних перетворювачів мікроелектронних теплових сенсорів потоку виходить за межі інженерних підходів та вимагає нових підходів та наукових досліджень.

1 АНАЛІЗ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЗАДАЧІ РОЗРОБКИ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ ЗАГАЛЬНОГО ТА БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1. Аналіз стану розвитку теплових сенсорів потоку загального та біомедичного призначення

Тепловий сенсор потоку (термоанемометр, thermal flow sensors, hot-wire anemometer) – це пристрій вимірювання швидкості потоку рідини чи газу, який базується на принципі вимірювання температурного поля локально нагрітої речовини потоку [40–43].

Розрізняють декілька базових методів формування сигналу обумовленого швидкістю потоку. В найпростішому методі вимірюють температуру розміщеного в потоці нагрівника – із збільшенням швидкості потоку, внаслідок тепловіддачі, температура нагрівника зменшується. Більш прогресивні методи передбачають локальний нагрів середовища потоку та вимірювання різниці температур в потоці в областях до (S1) та після (S2) нагрівника (heater) в напрямку поширення потоку (рис. 1.1). Це дозволяє, по-перше, вимірювати не лише швидкість потоку, але і його напрям, і, по-друге, мінімізувати вплив на результат вимірювання температури речовини потоку.

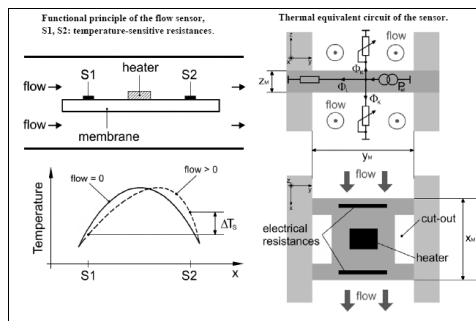


Рисунок 1.1 – Структура та функціональний принцип роботи мікроелектронних теплових сенсорів потоку

Розрізняють статичні та динамічні (часозалежні генераційні вимірювальні перетворювачі, Thermal Time-of-Flight Mode Transducers) схеми формування інформативного сигналу, зокрема, як це показано на прикладі біомедичного теплового сенсора потоку з інтегрованим сигнальним перетворювачем (рис. 1.2) [44–47].

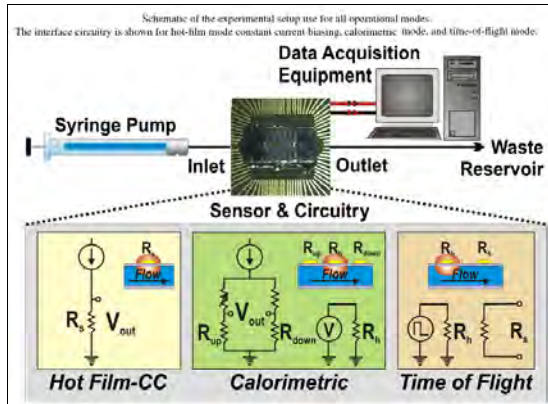
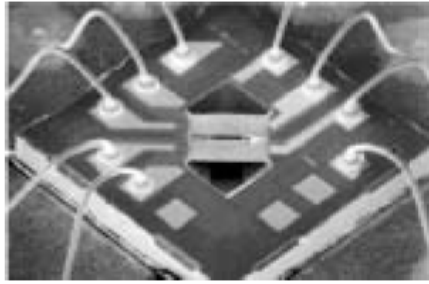


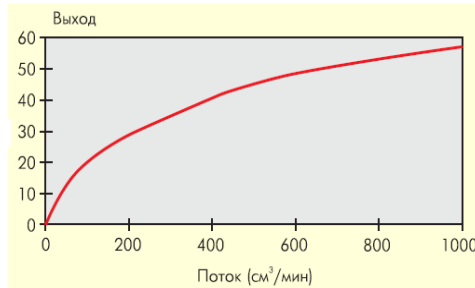
Рисунок 1.2 – Принципи формування сигналу в теплових сенсорах потоку

При необхідності вимірювати значні об'єми потоків в магістралі великого діаметра в останній формують байпасну (паралельно під'єднану до основної магістралі) трубку невеликого діаметра, потік в якій є пропорційним до потоку в магістралі. Вимірюючи швидкість потоку лише в байпасній трубці та апроксимуючи отриманий результат вимірювання на швидкість потоку в основній магістралі, досягають зменшення енерговитрат на нагрів потоку та мінімізують температурний вплив теплового витратоміра на потік в цілому.

В низці функціонально-структурних вирішень теплових сенсорів потоку їх сенсори різницевої температури поєднують з нагрівачами. В такому випадку сенсор потоку складається з двох функціонально інтегрованих елементів, кожний з яких нагрівається і, характеризуючись відомим значенням температурного коефіцієнта опору, забезпечує можливість формування сигналу про температуру. Температура першого в напрямку поширення потоку функціонально інтегрованого елемента є меншою відносно другого, аналогічного за розмірами та енергією нагріву, елемента, що обумовлено теплопереносом між цими елементами середовищем потоку. Приклад реалізації мікроелектронного сенсора потоку на основі функціонально інтегрованих елементів терморезистивного типу, зокрема моделі AWM2100V, – світового лідера в галузі мікроелектронної сенсорної електроніки фірми Honeywell наведено на рис. 1.3 [48].



а)



б)

Рисунок 1.3 – Мікроелектронна MEMS структура (а) теплового сенсора потоку та його типова характеристика (б)

Мембранна структура сенсора, що забезпечує мінімальне значення теплопередачі між функціонально інтегрованими елементами та чіпом інтегральної схеми, формується технологією кремнієвих MEMS структур (Micro-Electromechanical-Systems, Мікро-Електро-Механічні Системи). Габарити сенсора потоку на основі MEMS структури типово не перевищують декількох міліметрів при розмірах чутливих елементів (зокрема, функціонально інтегрованих елементів) порядку 100 мкм.

Важливе значення в теплових сенсорів потоку має також режим нагріву та взаємне розміщення сенсорів різницевої температури відносно нагрівника, зокрема про це йдеться в [49].

Новітній напрям Art of Science (мистецтво науки) теплових сенсорів потоку представлений багатодіапазонним MEMS сенсором потоку на основі матриці функціонально інтегрованих елементів [50]. Конструкцію такого сенсора показано на рис. 1.4, розподіл температури елементів – на рис. 1.5, а його зовнішній вигляд та приклад функціональної характеристики – на рис. 1.6.

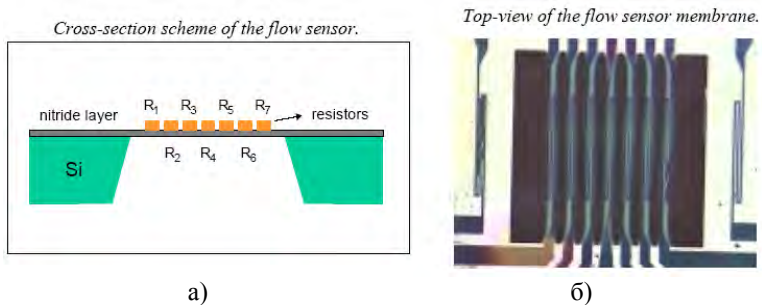


Рисунок 1.4 – Конструкція (схематичний поперечний переріз) теплового матричного MEMS сенсора потоку (а) та його фотографія (б)

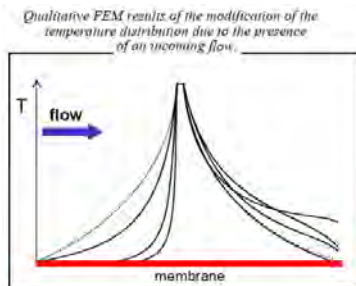


Рисунок 1.5 – Розподіл температури в теплому матричному сенсірі потоку

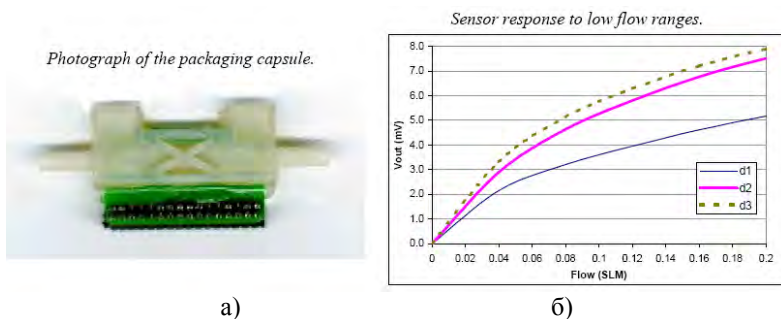


Рисунок 1.6 – Фотографія (а) та приклад функціональної характеристики (б) теплового матричного сенсора потоку

Конструкція, принцип формування сигналу та функціональні характеристики матричного сенсора потоку, що базується на частотному

методі формування інформативного сигналу (Thermal Time-of-Flight Mode), показані, відповідно, на рис. 1.7, 1.8 [51]. Такий метод забезпечує подальше зменшення енергоспоживання та можливість мікропроцесорного сигнального перетворення без використання аналого-цифрових перетворювачів.

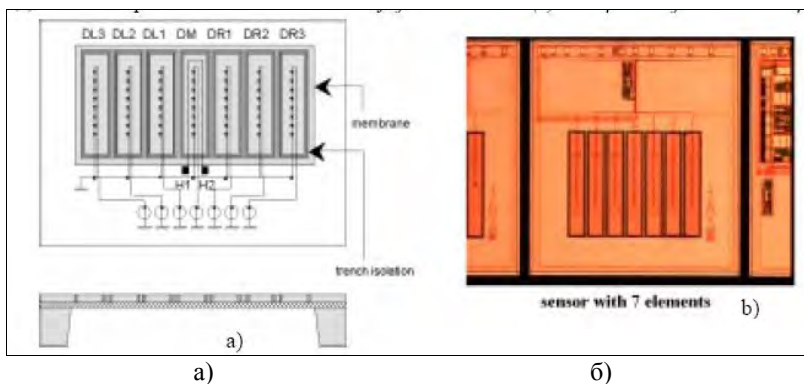


Рисунок 1.7 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) матричного Thermal Time-of-Flight Mode сенсора потоку

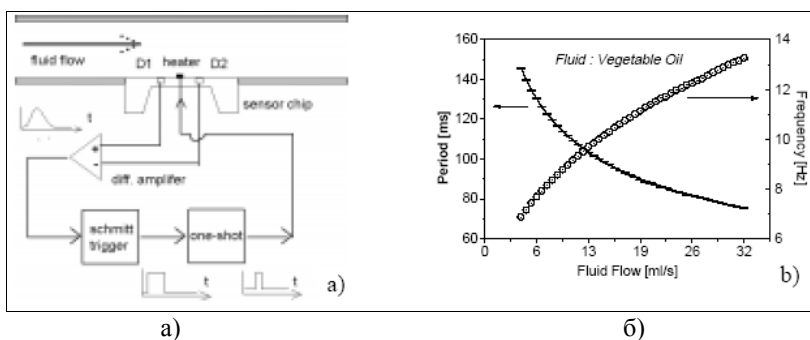


Рисунок 1.8 – Функціональна схема формування сигналу (а) та характеристики перетворення (б) матричного Thermal Time-of-Flight Mode сенсора потоку

Переважна більшість розглянутих вище теплових сенсорів потоку ще не отримали промислового впровадження – наведені публікації свідчать про реалізацію лише лабораторних зразків. Тому, з метою

більш повного представлення сучасного стану розвитку теплових сенсорів потоку, наведемо декілька прикладів масових та комерційно доступних пристроїв такого типу. Це, зокрема, теплові сенсори потоку компанії ELDRIDGE products Inc. (рис. 1.9), термоанемометри А-471 (рис. 1.10), Testo 405 (рис. 1.11) та Testo 425 (рис. 1.12), що представлені на ринку України Асоціацією «Індустрія-Україна» [52, 53]. Область застосування останніх – моніторинг умов праці на виробництвах, техніка безпеки, екологія тощо



Рисунок 1.9 – Інформаційні матеріали компанії ELDRIDGE products Inc

A-471 Цифровой термо-анемометр

A-471 Цифровой термо-анемометр

Четыре выбираемых при эксплуатации диапазона от 500 до 15000 футов/мин

Цифровые термо-анемометры серии 471 представляют собой универсальные приборы с двумя функциями, которые быстро и легко определяют скорость воздушного потока, либо в футах в минуту, либо метрах в секунду, и также температуру воздуха в F или C. Пятицифровой ЖК-дисплей показывает, как выбранный диапазон, так и текущую скорость.

В условиях плохой освещенности хорошая видимость обеспечивается достаточной яркой подсветкой. Для экономии батареи через 2-1/2 минуты подсветка автоматически выключается. Есть предупреждение о низкой емкости батареи. Я модель 471 на основе нержавеющей стали с удобной ручкой выровнена маркировка глубины погружения для 1/2 дюйма и 1-1/2 дюйма. В полностью.

Модели

Номер диапазона	Скорость, футов (FPM)	Скорость, м/с (MPS)	Температура
1	0-500	0-3.0	0/2 F / C
2	0-1500	0-7.0	0/2 F / C
3	0-5000	0-30	0/2 F / C
4	0-15000	0-75	0/2 F / C

Модель 471-1: Цифровой термо-анемометр с телескопической трубкой, регулируемой глубиной погружения, суммирующей скорость.

Модель 471-2: Цифровой термо-анемометр с телескопической трубкой, регулируемой глубиной погружения, суммирующей скорость.

Модель 471-3: Цифровой термо-анемометр с телескопической трубкой, регулируемой глубиной погружения, суммирующей скорость.

Рисунок 1.10 – Коротка характеристика термоанемометра А-471


Компактный термоанемометр testo 405 с поворотной головкой



- Дисплей на гибком шарнире с фиксатором.
- Точные "профессиональные сенсоры" впервые применяемые в недорогих приборах Стик-Класса.
- Управление при помощи одной кнопки.
- Большой и удобный для считывания данных дисплей.
- Встроенный колпачок для защиты датчиков влажности и скорости.
- Пользователь может легко заменить батарейки.
- Многофункциональный держатель (только для Стиков м/с, % ОВ и °С).
- Фиксатор для газодов (только для Стиков % ОВ и м/с).

Диапазон изм.:	0...5 м/с при -20...0 °С 0...10 м/с при 0...+50 °С 0...99990 м³/ч -20...+50 °С
Разрешение:	±0,01 м/с / ±0,1 °С
Погрешность:	±5 % от изм. знач. ±0,10 м/с (до 2 м/с) ±0,30 м/с (свыше 2 м/с) ± 0,5 °С
Рабочая темп.:	0...+50 °С
Темп. хранения:	-20...+70 °С
Тип батареек:	3 шт. размер ААА
Ресурс батареек:	Около 25 ч.
Зонд:	Ø 12/16 мм, Длина: около 300 мм
Самootключение:	Через 5 мин.
Гарантия:	1 год

Рисунок 1.11 – Коротка інформація термоанемометра Testo 405



testo 425

Компактный анемометр testo 425 со стационарно подсоединенным измерительным зондом температуры/скорости воздуха и телескопической рукояткой.

Объемный расход отображается непосредственно на дисплее. Точный расчет объемного расхода благодаря тому, что зонд легко помещается в воздуховод. Также возможно переключение на отображение показаний текущей температуры.

Функция усреднения по времени и количеству замеров, позволяет получить усредненные значения объемного расхода, скорости потока и температуры.

Мин/Макс значение можно также увидеть на дисплее. Функция Hold позволяет зафиксировать текущие данные измерений на дисплее.

Технические данные		
Тип зонда	Обогреваемый	NTC
Диапазон измер.	0 до +20 м/с	-20 до +70 °С
Погрешность	±(0,03 м/с +5% от изм. зн.)	±0,5 °С (0 до+60 °С) ±0,7 °С (в ост. диалп.)
Разрешение	0,01 м/с	0,1 °С
Рабочая темп.	-20 до +50 °С	Габариты
Темп. хранения	-40 до +85 °С	182 x 64 x 40 мм
Тип батареек	Алкалиновая	Вес
Ресурс батареек	20 ч	285 г
		Материал/корпус
		ABS
		Гарантия
		2 года

Рисунок 1.12 – Коротка інформація термоанемометра Testo 425

Розглянемо більш детально теплові сенсори потоку біомедичного призначення. Цій тематиці присвячено низку інформаційних ресурсів,

які відображають, зокрема, специфіку пристроїв біомедичного призначення [131–135], наукові роботи зі створення сенсорів потоку біомедичного призначення в лабораторіях Bio-MEMS & Microsystems Laboratory of University of South Florida (рис. 1.13) [54] та State of Utah Center of Excellence for Boimedical Microfluidics (рис. 1.14) [55].



Рисунок 1.13 – Інформаційний ресурс Bio-MEMS & Microsystems Laboratory of University of South Florida



Рисунок 1.14 – Інформаційний ресурс State of Utah Center of Excellence for Boimedical Microfluidics

Основними вимогами до сенсорів потоку біомедичного призначення є біохімічна сумісність матеріалів та здатність вимірювати малі

значення швидкості (масопереносу) досліджуваного потоку рідини чи газу. У випадку використання цих сенсорів для дослідження параметрів дихальної системи основною вимогою є мінімальна інертність та ергономічні показники. Сенсори для біомедичних in-situ досліджень повинні характеризуватися мінімальними габаритами та енергоспоживанням.

Зокрема, на рис. 1.15 наведено конструкцію та функціональну характеристику мікроелектронного сенсора потоку біомедичного призначення [47]. Сенсор виготовлено на основі LTCC (Low Temperature Coffered Ceramics) кераміки з використанням елементів товстоплівкової технології, що забезпечує біохімічну сумісність з досліджуваними рідинами.

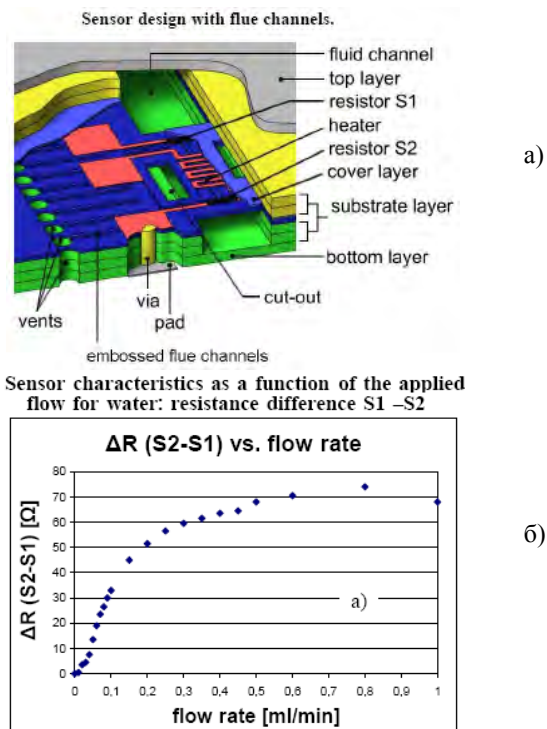


Рисунок 1.15 – Конструкція (а) та функціональна характеристика (б) LTCC мікроелектронного сенсора потоку біомедичного призначення

Іншим характерним прикладом сенсора потоку біомедичного призначення є мікроелектронний модуль на основі біосумісної MEMS матриці [46]. Матриця сенсора реалізована на основі біосумісної парилінової мембрани (Parylene C Membrane) з платиновими сенсорними елементами. З метою покращення термічної ізоляції теплового сенсора потоку його мембрана «підвішена» над балочним мікромеханічним каналом, виготовленим з кремнію. Принцип функціонування та конструкція сенсора показані на рис. 1.16, послідовність формування його структури – на рис. 1.17, а зовнішній вигляд – на рис. 1.18. Широкий набір функціональних характеристик вказаного сенсора потоку в різноманітних режимах його роботи можна бачити на рис. 1.19–1.22.

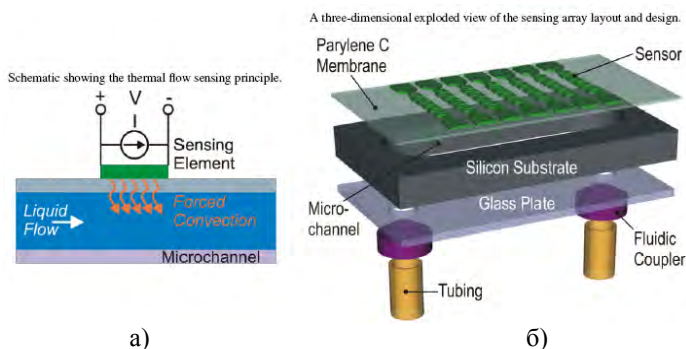


Рисунок 1.16 – Принцип функціонування (а) та конструкція (б) мікроелектронного сенсора потоку біомедичного призначення на основі Parylene C Membrane [46]

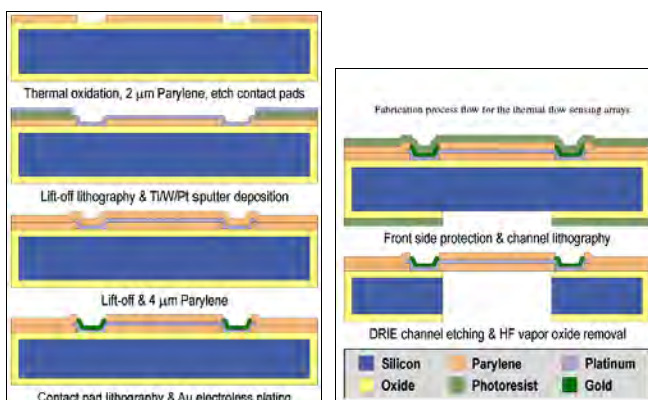


Рисунок 1.17 – Послідовність формування структури сенсора потоку [46]

Photographs of completely packaged thermal flow sensing arrays.

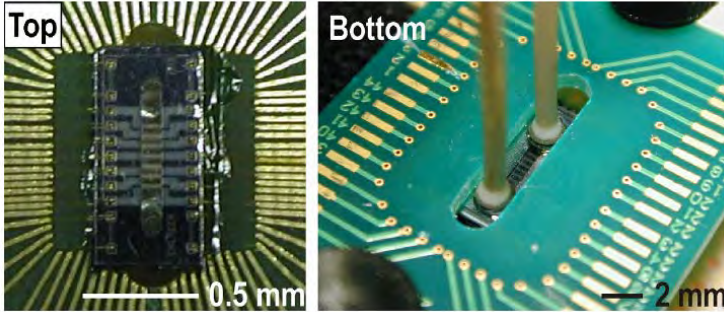


Рисунок 1.18 – Зовнішній вигляд сенсора потоку [46]

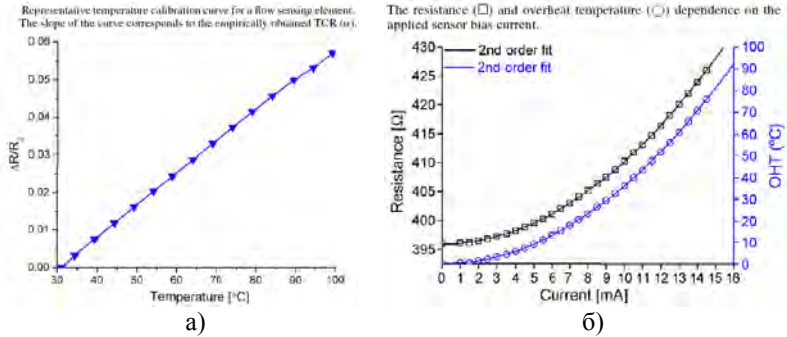


Рисунок 1.19 – Температурна (а) та струмова (б) терморезистивних елементів сенсора потоку [46]

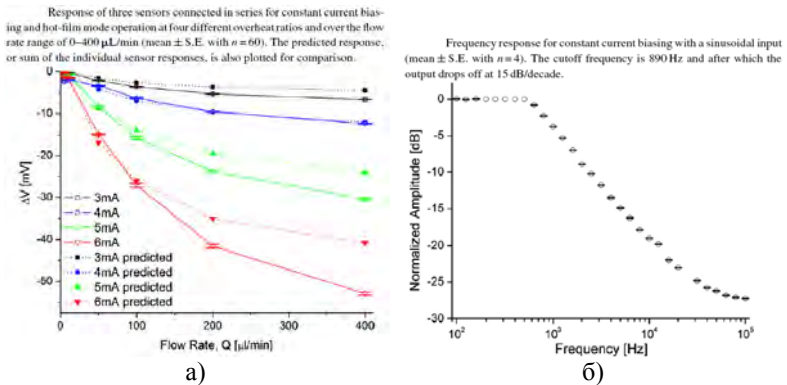


Рисунок 1.20 – Функціональна (а) та частотна (б) характеристики сенсора потоку [46]

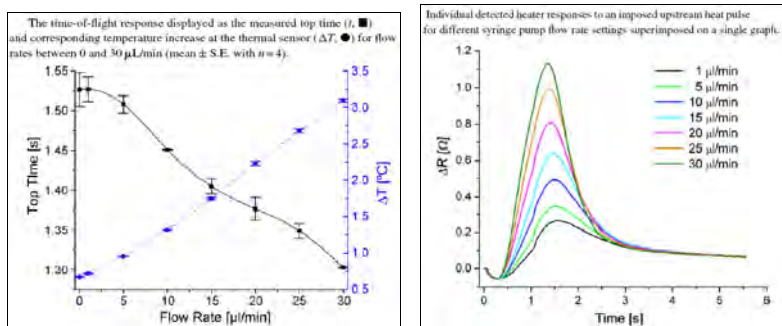


Рисунок 1.21 – Часові функціональні характеристики сенсора потоку [46]

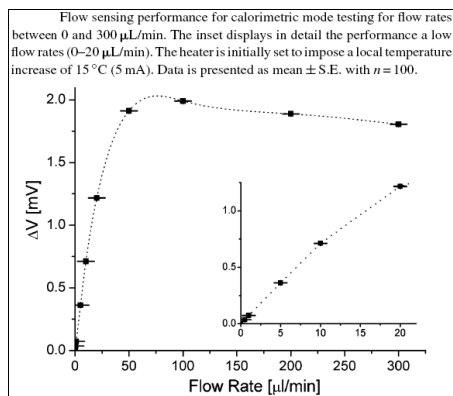


Рисунок 1.22 – Функціональна характеристика сенсора потоку при великій та малій швидкості потоку [46]

Аналіз характеристик розглянутих сенсорів дозволяє зробити низку важливих з точки зору задач цієї роботи висновків.

По-перше, сучасні мікроелектронні сенсори потоку, і зокрема сенсори біомедичного призначення, характеризуються значним різноманіттям принципів формування сигналу – від елементарних лінійних перетворювачів на основі одного чутливого елемента і до нелінійних (генераційних, часозалежних) перетворювачів на основі матриць функціонально інтегрованих елементів. Реалізація цих принципів ставить задачу розробки відповідних сигнальних перетворювачів, що відповідають вимогам сучасної мікроелектроніки.

По-друге, розширення діапазону вимірювання швидкості потоків має значну проблематику – характеристика перетворення сенсорів, що дозволяють вимірювати малі потоки, стає дуже нелінійною при збільшенні швидкості потоку. При певних критичних значеннях швидкості спостерігається екстремум функції перетворення, і це робить неможливим вимірювання як малих, так і великих швидкостей. Вирішення цієї проблеми потребує відповідного керування тепловою потужністю нагрівачів сенсора та низки інших схемотехнічних вирішень.

По-третє, актуальною залишається проблема енергоспоживання теплових сенсорів потоку. Особливо це характерно при живленні сенсорів біомедичного призначення від автономних, тобто малогабаритних малопотужних низьковольтних електрохімічних елементів. Адже нагрів речовини потоку в порівнянні з енергоспоживанням сучасних мікропотужних CMOS інтегральних схем вимагає суттєво більшої енергії. Крім того, із зменшенням напруги живлення (для малогабаритних автономних джерел живлення – це типово не більше 3 В), необхідно зменшувати і опір нагрівних елементів. При використанні функціонально інтегрованих елементів, що використовуються як для нагріву, так і для вимірювання температури, зменшення опору (типово до величин менше 100 Ом) призводить до паразитного впливу на результат вимірювання сигнальних ліній. Таким чином, зменшення енергоспоживання (потужності та температури нагріву) призводить до виникнення паразитного впливу опорів сигнальних ліній і, як наслідок, до погіршення функціональних характеристик, зокрема, зменшення точності вимірювання швидкості потоку.

Вирішення цих задач, поряд з низкою інших, мова про які піде далі, стало основним завданням цієї роботи.

1.2. Особливості теплового розрахунку теплових сенсорів потоку загального та біомедичного призначення

У загальному випадку залежність між температурними параметрами термоанемометричного первинного перетворювача та параметрами потоку може бути записана у вигляді рівняння Н'ютона-Ріхмана [1–5]

$$P_n = K_1 \alpha F \Delta t, \quad (1.1)$$

де K_1 – коефіцієнт, який вводиться, оскільки в більшості випадків вимірюється не різниця температур поверхні теплообміну та рідини, а якась інша величина Δt ; α – коефіцієнт тепловіддачі; F – поверхня теплообміну; Δt – різниця температур.

У загальному вигляді коефіцієнт тепловіддачі визначається критеріальною залежністю

$$\text{Nu} = A \text{Re}^n \text{Pr}^b \text{Gr}^c \left(\frac{\text{Pr}_\delta}{\text{Pr}_c} \right)^d, \quad (1.2)$$

де Nu – критерій Нуссельта, який характеризує теплообмін між поверхнею стінки та рідиною (газом); Re – критерій Рейнольдса, який характеризує співвідношення сил інерції і в'язкості та визначає характер течії рідини (газу); Pr – критерій Прандтля, який характеризує фізичні властивості рідини (газу); Gr – критерій Грасгофа, який характеризує підйомну силу, що виникає в рідині (газі) внаслідок різниці густин.

Критерій подібності Прандтля Pr є суто фізичним параметром, який характеризує властивості потоку. Критерій Грасгофа Gr також не містить швидкості потоку і лише характеризує взаємодію молекулярного тертя та підйомної сили, що обумовлена різницею густин в окремих точках потоку через його неізотермічність. Лише критерій Рейнольда Re містить в собі швидкість потоку, яка нас цікавить. Тому в загальному випадку зв'язок (1.2) між критерієм Нуссельда Nu , який містить коефіцієнт тепловіддачі, та критерієм Рейнольда, який містить швидкість потоку v , може бути записаний у вигляді

$$\text{Nu} = C \text{Re}^n, \quad (1.3)$$

де C – питома теплоємність вимірювального середовища;
або

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = C \left(\frac{v d \rho}{\mu} \right)^n, \quad (1.4)$$

звідки

$$\alpha = C \frac{\lambda d^{n-1} \rho^n}{\mu^n} v^n = C \frac{\lambda d^{n-1}}{\mu^n} G_m^n, \quad (1.5)$$

де d – діаметр трубки, в якій вимірюють швидкість потоку; v – швидкість потоку; ρ , μ , λ – відповідно густина, в'язкість, теплопровідність вимірюваного середовища; G_m – масова витрата.

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-500-7>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-500-7>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page
<http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-500-7>

Наукове видання

**Готра Зенон Юрійович
Павлов Сергій Володимирович
Голяка Роман Любомирович
Вуйцик Вальдемар
Осадчук Олександр Володимирович
Куленко Сергій Сергійович**

**МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИГНАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ТЕПЛОВИХ СЕНСОРІВ ПОТОКУ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено С. Павловим

Підписано до друку 26.11.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 13,86
Наклад 100 прим. Зам № 2012-188

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.