

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.

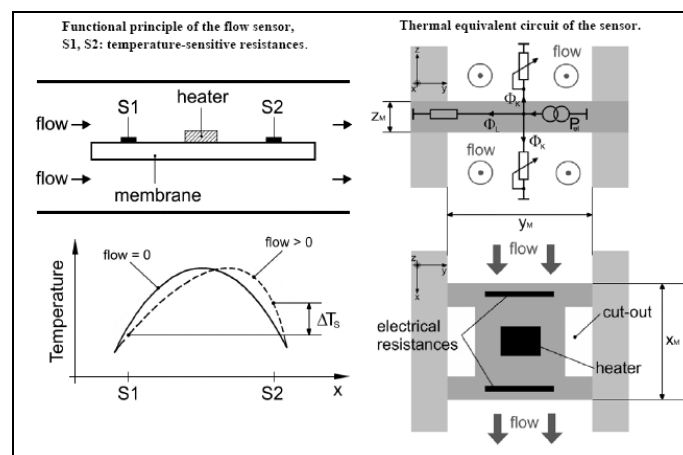


Рисунок 1.1 – Структура та функціональний принцип роботи мікроелектронних теплових сенсорів потоку

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].

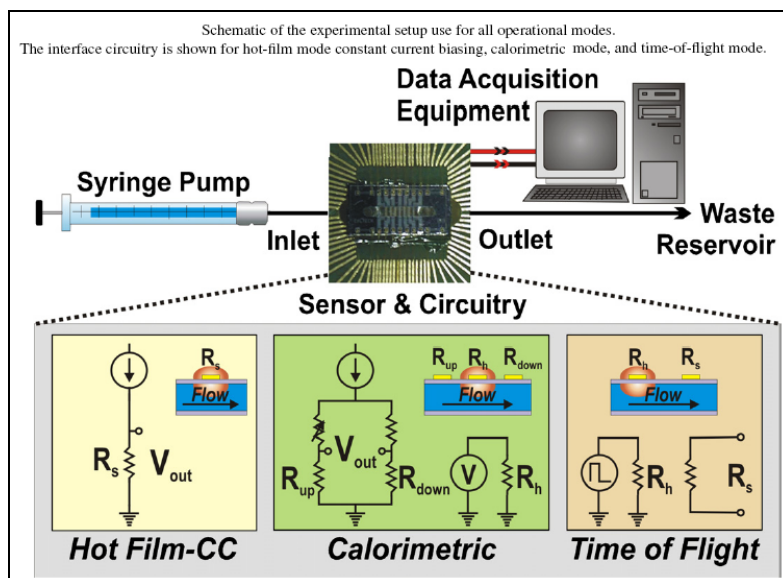
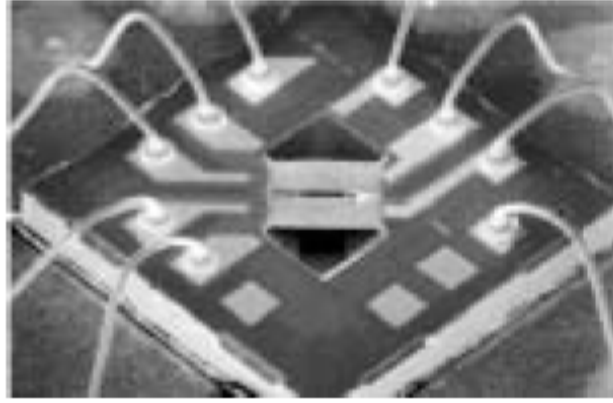


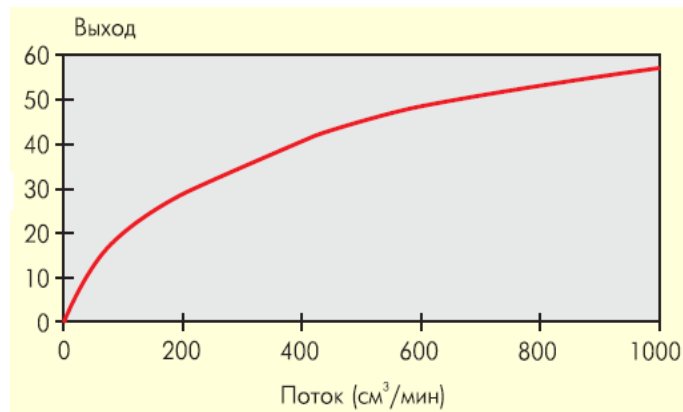
Рисунок 1.2 – Принципи формування сигналу в теплових сенсорах потоку

При необхідності вимірювати значні об'єми потоків в магістралі великого діаметра в останній формують байпасну (паралельно під'єдану 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.

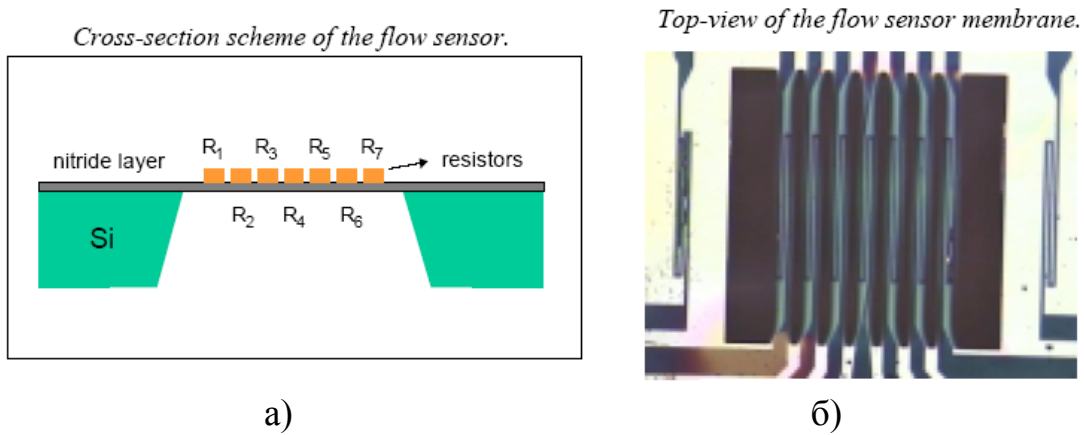


Рисунок 1.4 – Конструкція (схематичний поперечний переріз) теплового матричного MEMS сенсора потоку (а) та його фотографія (б)

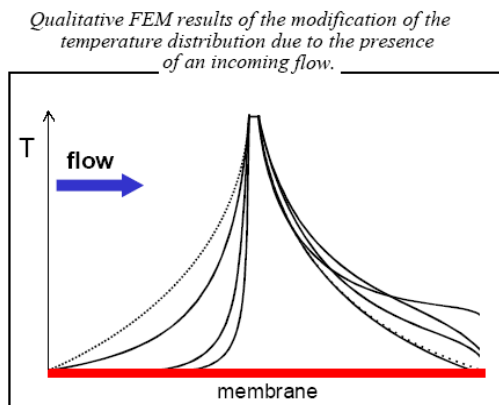


Рисунок 1.5 – Розподіл температури в теплому матричному сенсорі потоку

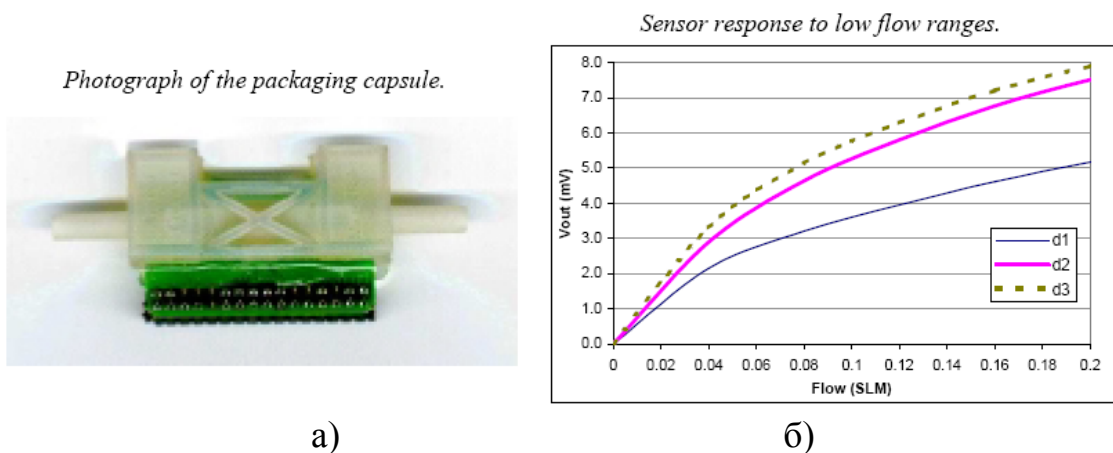


Рисунок 1.6 – Фотографія (а) та приклад функціональної характеристики (б) теплового матричного сенсора потоку

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.

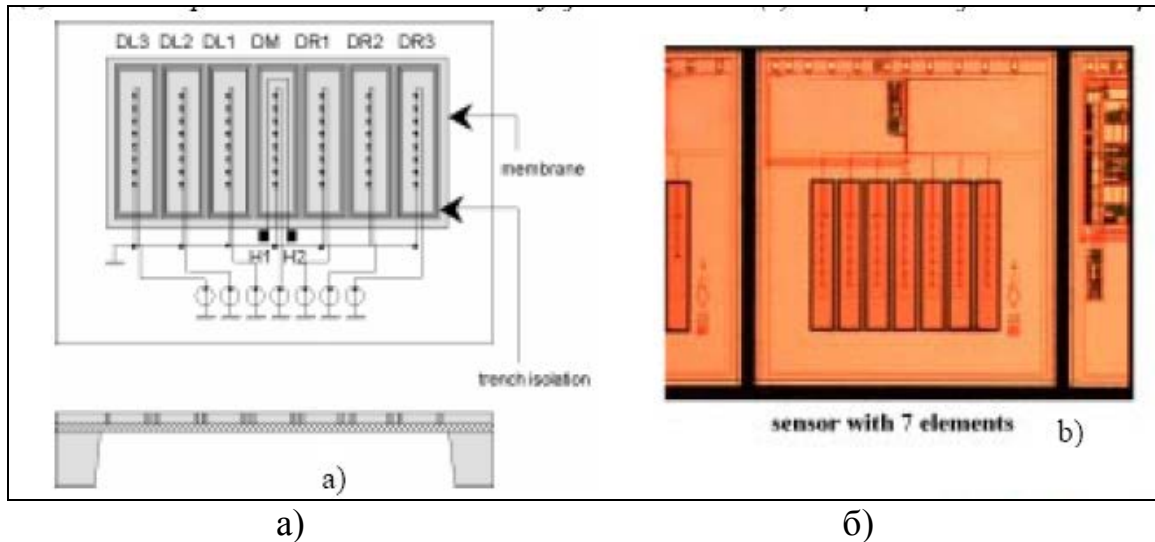


Рисунок 1.7 – Конструкція (а) та зовнішній вигляд (б) матричного Thermal Time-of-Flight Mode сенсора потоку

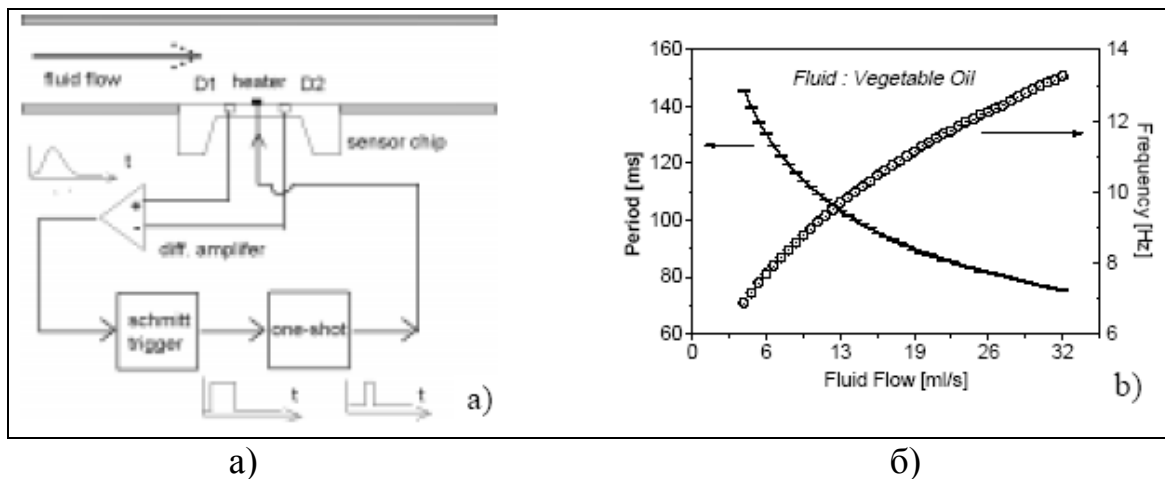


Рисунок 1.8 – Функціональна схема формування сигналу (а) та характеристики перетворення (б) матричного Thermal Time-of-Flight Mode сенсора потоку

Переважаюча 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

ELDRIDGE PRODUCTS INC - Thermal Gas Mass Flow Measurement and Control Instrumentation

Eldridge Products Inc - Abbreviated as EPI, has more than 20 years experience in the design and production of thermal mass flow meters and flow switches.

The Eldridge Master-Touch flowmeters include microprocessor technology and remains at the forefront of thermal gas mass flow instrumentation.

Eldridge manufactures a range of in-line and insertion style thermal mass flow meters with integral and remote electronics options. Single point and multipoint units as well as the new Thermal Flow Averaging tube is unique to Eldridge Products Inc.

Рисунок 1.9 – Інформаційні матеріали компанії ELDRIDGE products Inc

А-471 Цифровой термо-анемометр

А-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, а также температуру воздуха в F или C. Высококонтрастный ЖК дисплей показывает, как выбранный диапазон, так и текущую скорость.

В условиях плохой освещенности хорошая видимость обеспечивается достаточной задней подсветкой. Для экономии батареи через 2-1/2 минуты подсветка автоматически выключается. Есть предупреждение о низкой емкости батареи. В модели 471 на зонде из нержавеющей стали с удобной ручкой выгравирована маркировка глубины погружения для 0-8 дюймов и 0-20 см. В полностью

Модели

Номер диапазона	Скорость, футов/мин (FPM)	Скорость, м/сек (MPS)	Точность
1	0-500	0-3,0	±3% F.S.
2	0-1500	0-7,0	±3% F.S.
3	0-5000	0-30	±4% F.S.
4	0-15000	0-75	±5% F.S.

Номера модели

Модель 471-1

Модель 471-2

Модель 471-3

Цифровой термо-анемометр включает батарею, антистатический браслет, 6-ступенчатое сверло, сумку для переноски и инструкции.

Цифровой термо-анемометр с телескопическим зондом включает батарею, антистатический браслет, 6-ступенчатое сверло, сумку для переноски и инструкции.

Цифровой термо-анемометр с телескопическим изгибаемым наконечником включает батарею, антистатический браслет, 6-ступенчатое сверло, сумку для переноски и инструкции.

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 газоходов (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 AAA
Ресурс батареек:	Около 25 ч.
Зонд:	Ø 12/16 мм, Длина: около 300 мм
Самоотключение:	Через 5 мин.
Гарантия:	1 год

Рисунок 1.11 – Коротка інформація термоанемометра Testo 405



testo 425

Компактный анемометр testo 425 со стационарно подсоединенным обогреваемым 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 ±1 цифра	±(0.03 м/с +5% от изм. зн.)	±0.5 °С (0 до+60 °С) ±0.7 °С (в ост. diap.)
Разрешение	0.01 м/с	0.1 °С
Рабочая темп.	-20 до +50 °С	Габариты 182 x 64 x 40 мм
Темп. хранения	-40 до +85 °С	Вес 285 г
Тип батареек	Алкалиновая	Материал/корпус ABS
Ресурс батареек	20 ч	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 Biomedical Microfluidics (рис. 1.14) [55].

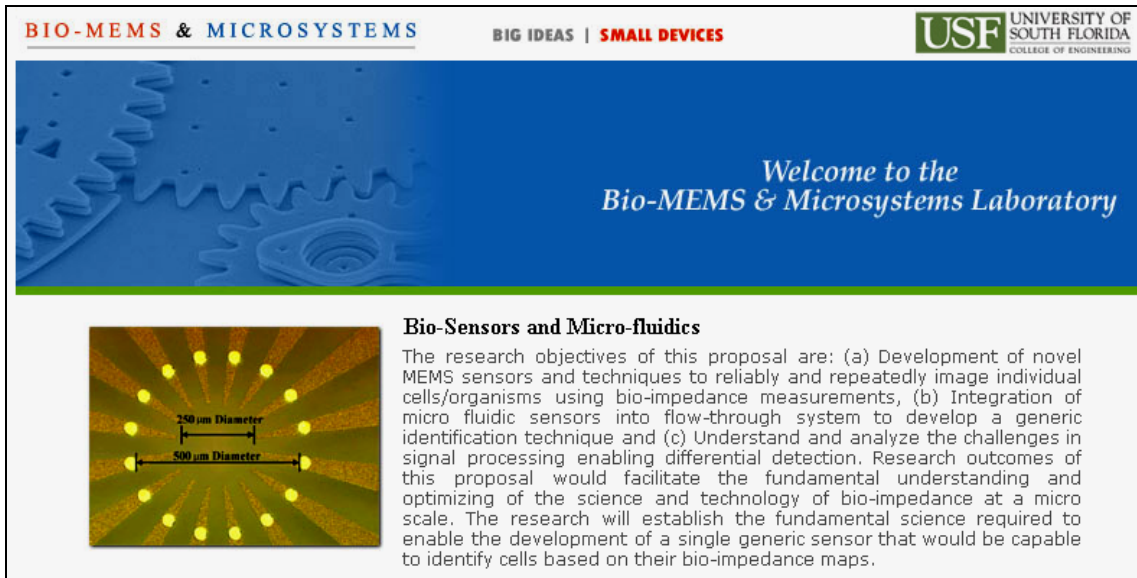


Рисунок 1.13 – Інформаційний ресурс Bio-MEMS & Microsystems Laboratory of University of South Florida

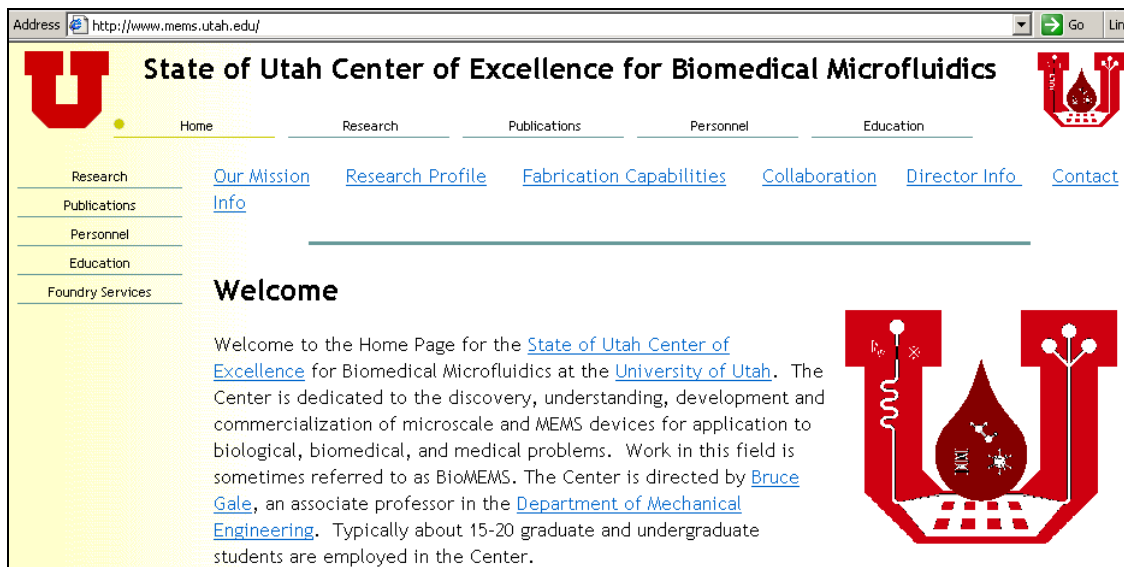


Рисунок 1.14 – Інформаційний ресурс State of Utah Center of Excellence for Biomedical Microfluidics

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.

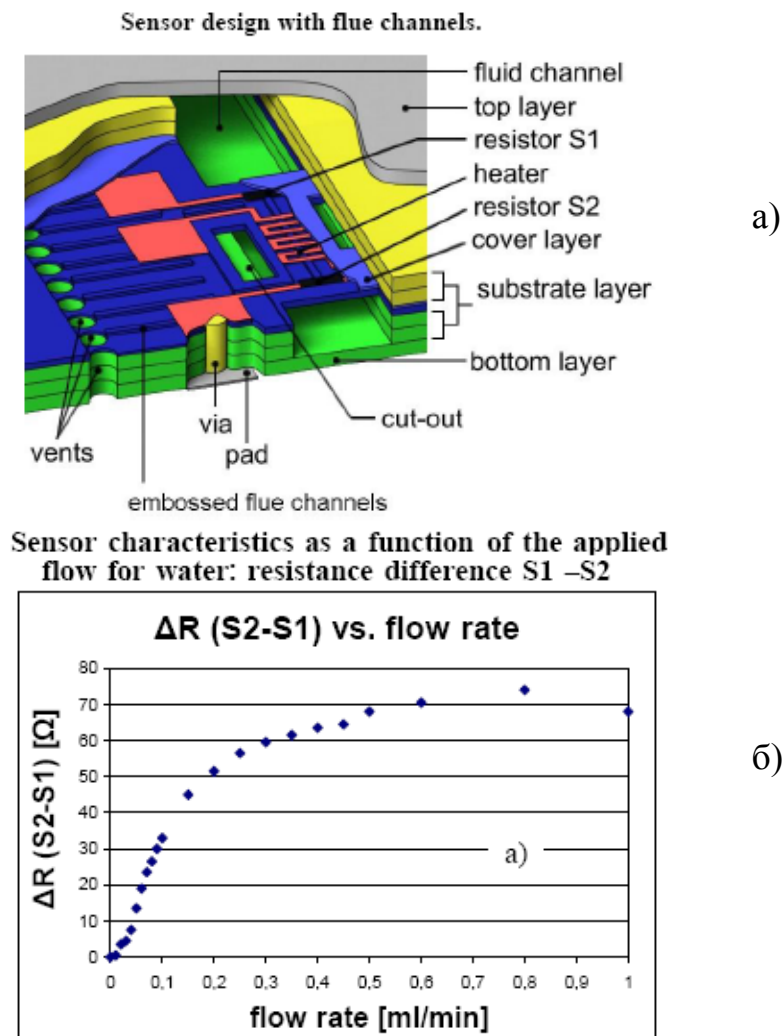


Рисунок 1.15 – Конструкція (а) та функціональна характеристика (б) LTCC мікроелектронного сенсора потоку біомедичного призначення

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.

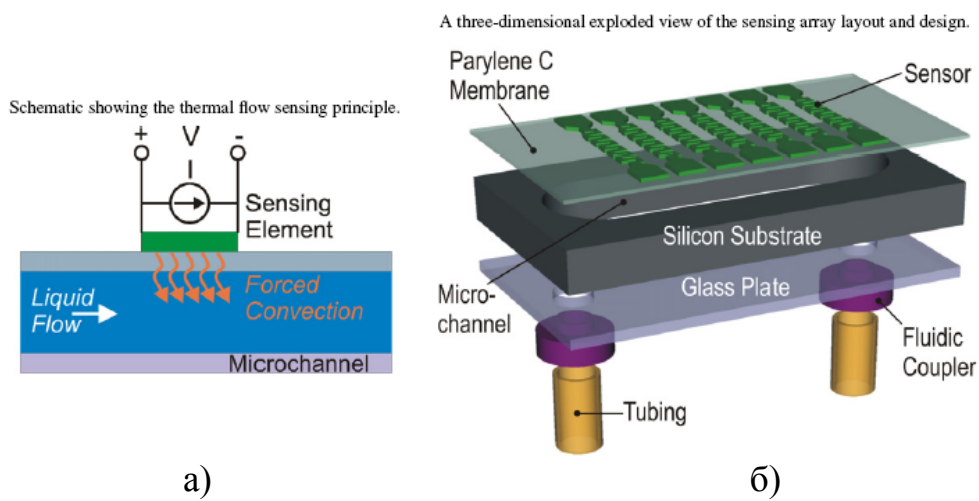


Рисунок 1.16 – Принцип функціонування (а) та конструкція (б) мікроелектронного сенсора потоку біомедичного призначення на основі Parylene C Membrane [46]

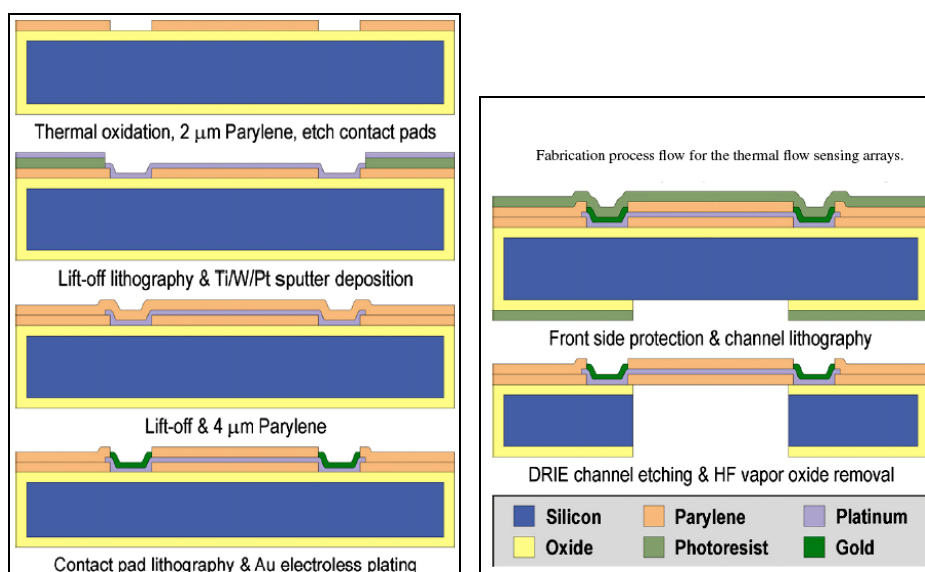


Рисунок 1.17 – Послідовність формування структури сенсора потоку [46]

Photographs of completely packaged thermal flow sensing arrays.

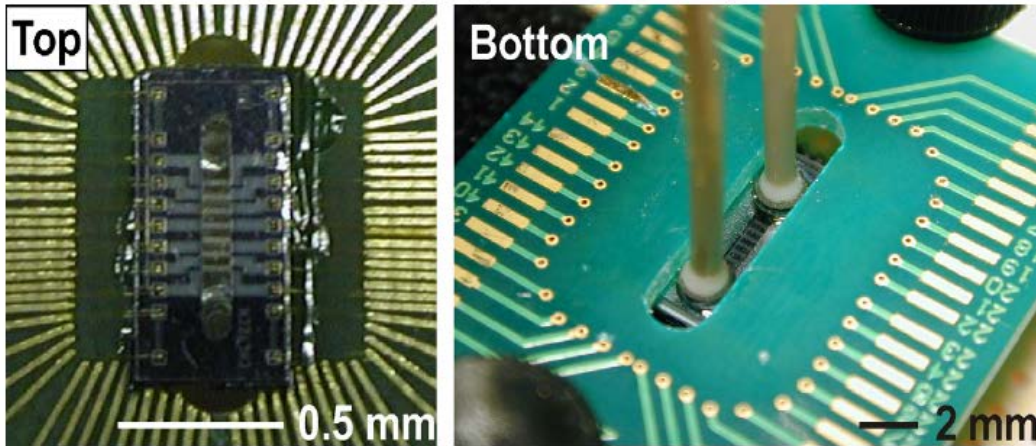


Рисунок 1.18 – Зовнішній вигляд сенсора потоку [46]

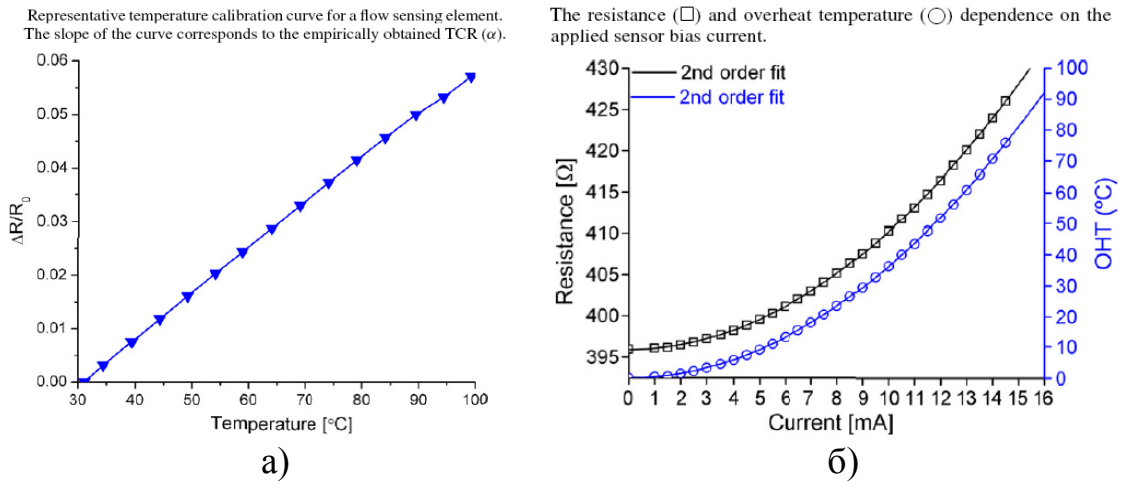


Рисунок 1.19 – Температурна (а) та струмова (б) терморезистивних елементів сенсора потоку [46]

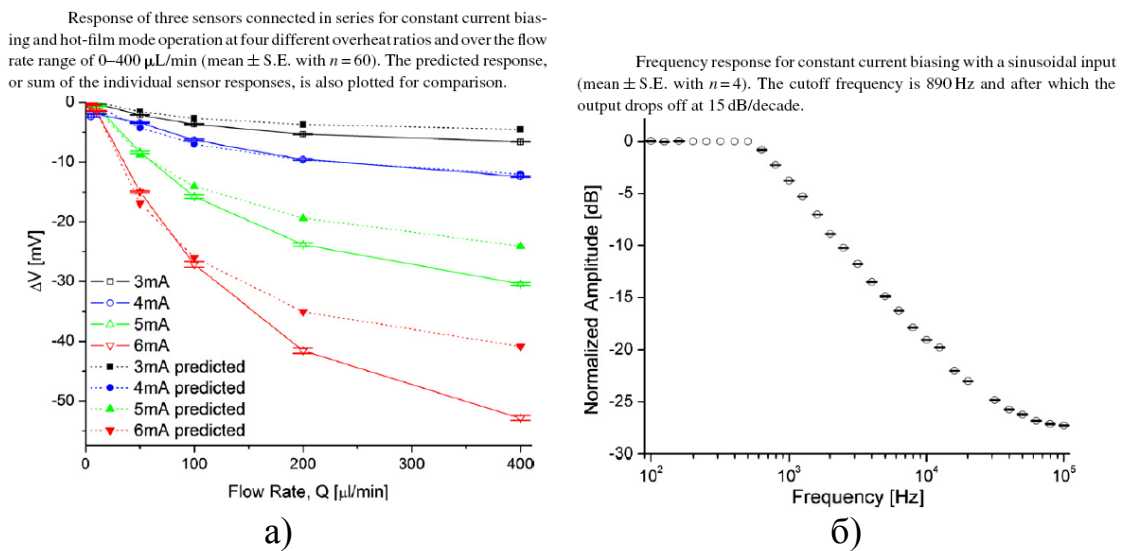


Рисунок 1.20 – Функціональна (а) та частотна (б) характеристики сенсора потоку [46]

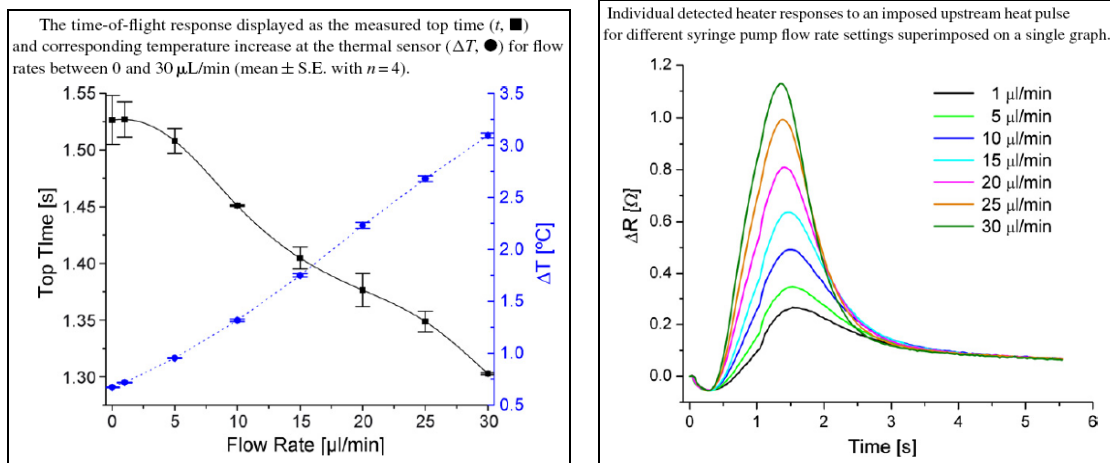


Рисунок 1.21 – Часові функціональні характеристики сенсора потоку [46]

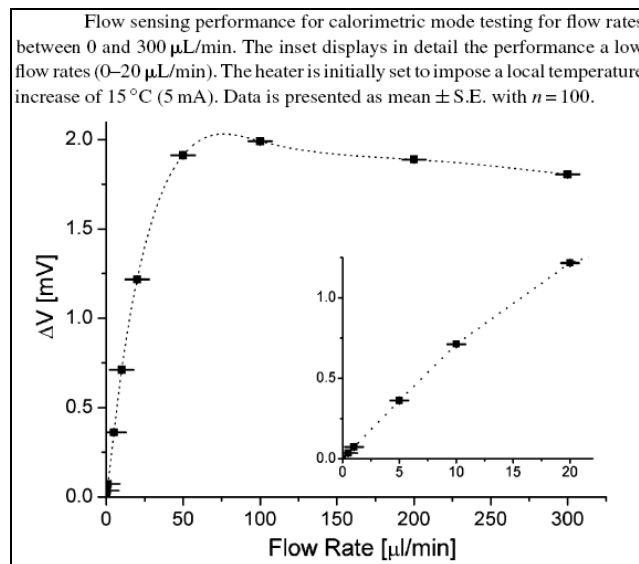


Рисунок 1.22 – Функціональна характеристика сенсора потоку при великій та малій швидкості потоку [46]

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

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

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 Нуссельта Nu , який містить коефіцієнт тепловіддачі, та критерієм Рейнольда, який містить швидкість потоку v , може бути записаний у вигляді

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

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.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mohamed Gad-el-Hak. Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management. – Cambridge University Press. 2000. – 421 p.
2. E. L. Upp, Paul J. LaNasa. Fluid flow measurement: a practical guide to accurate flow measurement. – Gulf Professional Publishing. 2002. – 264 p.
3. David W. Spitzer. Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control. – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2001. – 828 p.
4. Richard Miller. Flow Measurement Engineering Handbook. – McGraw-Hill Professional. 1996. – 1168 p.
5. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ / П. П. Кремлевский. – Изд. Политехника, 2004. – 412 с.
6. Fleming W.J. Overview of automotive sensors // Sensors Journal, IEEE. – 2001. – Vol. 1, No. 4. – P. 296–308.
7. P. Gravesen, J. Branebjerg, O.S. Jensen. Microfluidics – a review // J. Micromech. Microeng. – 1993. – No. 3. – P. 168–182.
8. P. Norlin, O. Öhman, B. Ekström, L. Forsen. A chemical microanalysis system for the measurement of pressure, flow rate, temperature, conductivity, UV-absorption and fluorescence // Sensors and Actuators: B. – 1998. – No. 49. – P. 34–39.
9. N.T. Nguyen. Micromachined flow sensors – a review // Flow Meas. Instrum. – 1997. No. 8. – P. 7–16.
10. N.T. Nguyen, R. Kiehnscherf. Low-cost silicon sensors for mass flow measurements of liquids and gases // Sens. Actuators A: Phys. – 1995. – No. 49. – P. 17–20.
11. J. Chen, Z.F. Fan, J. Zou, J. Engel, C. Liu. Two-dimensional micromachined flow sensor array for fluid mechanics studies // J. Aerospace Eng. – 2003. – No. 16. – P. 85–97.
12. J. VanKuijk, T.S.J. Lammerink, H.-E. de Bree, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman. Multi-parameter detection in fluid flows // Sensors and Actuators A: Phys. – 1995. – No. 47. – P. 369–372.
13. Jungkyu Kim, Bruce K. Gale. Rapid prototyping of microfluidic systems using a PDMS/polymer tape composite // Lab. Chip. – 2009. – Vol. 9. – P. 1290–1293.

14. Rebecca L. Rich, Adam R. Miles, Bruce K. Gale, David G. Myszka. Detergent screening of a GPCR using serial and array biosensor technologies // *Anal. Biochem.* – 2009.– Vol. 386, No. 1. – P. 98–104.
15. Kathryn A. Smith, Bruce K. Gale, John C. Conboy. Micropatterned fluid lipid bilayer array // *Anal. Chem.* Vol. 80, No. 21. – P. 7980–7987.
16. Niel Crews, Timothy A. Ameel, Carl Wittwer, Bruce Gale. Flow-Induced Thermal Effects on Spatial DNA Melting // *Lab. Chip.* – 2008. – Vol. 8. – P. 1922–1929.
17. Mark A. Eddings, Michael A. Johnson, Bruce K. Gale. Determining the optimal PDMS–PDMS bonding technique for microfluidic devices // *J. Micromech. Microeng.* – 2008. – Vol. 18. – P. 1–4.
18. Niel Crews, Carl Wittwer, Bruce Gale. Continuous-Flow Thermal Gradient PCR // *Biomed. Microdevices.* – 2008. – Vol. 10, No. 2. – P. 13–19.
19. Bruno Frazier, Karin D. Caldwell, Bruce K. Gale, Ian Papautsky. Integrated micromachined components for biological analysis systems // *Journal of Micromechatronics.* – 2000. – Vol. 1, No. 1. – P. 67–84.
20. Bruce K. Gale. Novel Techniques and Instruments for Field Flow Fractionation of Biological Materials // *Proc. 225th ACS National Meeting, New Orleans, LA, March 23–27, 2003.* – P. 107–109.
21. Електронна енциклопедія Wikipedia. [Електронний ресурс]: [http:// wikipedia.org](http://wikipedia.org).
22. Чутники електромагнітного випромінювання для біотехнічних досліджень / Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, М. А. Вайнтрауб, Т. Р. Ключко. – К. : МП Леся, 2004. – 64 с.
23. Інтернет-ресурс Fluidic Flowmeters. – Режим доступу : <http://www.fluidicflow-meters.com>.
24. Інтернет-ресурс Pentagon Reports. – Режим доступу : <http://www.stormingmedia.us>.
25. George Mon. Advanced Fluidic Temperature Studies // *Storming Media. Pentagon Reports.* [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://www.stormingmedia.-us/89/8987 /D898700.html>.
26. Robert W. Young, Leonard D. Dansbury. Fluidic Interface Means // *Storming Media. Pentagon Reports.* – Режим доступу : <http://www.stormingmedia.us/95/9527/ D952700.html>.

27. Allen B. Holmes. Electro Fluidic Actuator // Storming Media. Pentagon Reports. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.stormingmedia.us/28/2898/D289800.html>.
28. Walter M. Posingies. Advanced Fluidic Temperature Studies. // Storming Media. Pentagon Reports. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.stormingmedia.us/74/7413/A741360.html>.
29. Leonard M. Sieracki. Handbook of Fluidic Sensors // Storming Media. Pentagon Reports. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.stormingmedia.us/54/5411/A541140.html>.
30. Carl J. Campagnuolo; Harold S. Duff; Henry C. Lee; Frank E. Blodgett; Leon Scheinine. A Fluidic Generator as an Environmental and Safety Device for the SUU53/A Cartridge Dispenser // Storming Media. Pentagon Reports. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.stormingmedia.us/02/0218/A021830.html>.
31. E. Meng, S. Gassmann, Y.-C. Tai. A MEMS body fluid flow sensor // Micro Total Analysis Systems. – 2001. Monterey, CA. – P. 167–168.
32. S. Wu, Q. Lin, Y. Yuen, Y.-C. Tai. MEMS flow sensors for nanofluidic applications // Sensors and Actuators A : Phys. – 2001. – No. 89. – P. 152–158.
33. E. Meng, Y.-C. Tai. A Parylene MEMS flow sensing array // Transducers 2003. Boston, MA, June 8–12, 2003. – P. 686–689.
34. C.Q. Yang, H. Soeberg. Monolithic flow sensor for measuring milliliter per minute liquid flow // Sensors and Actuators A : Phys. – 1992 – No 33. – P. 143–153.
35. Y. Itoh and K. Takahashi. Nano thermal sensor for micro fluidic devices // Proc. 22nd Sensors Symposium. – 2005. – P. 171–174.
36. Компактные портативные ультразвуковые расходомеры жидкости PORTAFLOW. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.energotest.ru/fm.html>.
37. Arshak Poghossian, Lars Berndsen, Michael J. Schöning. Chemical sensor as physical sensor: ISFET-based flow-velocity, flow-direction and diffusion-coefficient sensor // The 16th European Conference on Solid-State Transducers September 15-18, – 2002. TP33 – P.649–650.
38. D. Lee, X. Sun, E. Quevy, R. T. Howe, T.-J. King. WetFET-Novel Fluidic Gate-Dielectric Transistor for Sensor Applications // IEEE VLSI-TSA Meeting Technical Digest. – 2007. – P. 124–125.

39. P. Bergveld. Thirty years of ISFETology: what happened in the next 30 years and what may happen in the next 30 years // Sensors and Actuators B. – 2003. – No. 88. – P. 1–20.
40. B.W. van Oudheusden. Silicon thermal flow sensors // Sensors and Actuators A: Phys. – 1992. – No. 30. – P. 5–26.
41. M. Ashauer, H. Glosch, F. Hedrich, N. Hey, H. Sandmaier, W. Lang. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles // Sensors and Actuators A. – 1999. – Vol. 73. – P. 7–13.
42. F. Jiang, Y.-C. Tai, C.-M. Ho, R. Karan, M. Garstenauer. Theoretical and experimental studies of micromachined hot-wire anemometers // International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, December, 11–14. – 1994. – P. 139–142.
43. J.J. van Baar, R.W. Wiegerink, T.S.J. Lammerink, G.J.M. Krijnen, M. Elwenspoek. Micromachined structures for the thermal measurements of fluid and flow parameters // J. Micromech. Microeng. – 2001. – No. 11. – P. 311–318.
44. T. S. T. Lammerink, N. R. Tas, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman. Micro-liquid flow sensor // Sensors and Actuators A. – 1993. – P. 45–50.
45. P.M. Handford, P. Bradshaw. The pulsed-wire anemometer // Exp. Fluids 7. – 1989. – P. 125–132.
46. Ellis Menga, Po-Ying Li, Yu-Chong Tai. A biocompatible Parylene thermal flow sensing array // Sensors and Actuators A. – 2008. – No. 144. – P. 18–28.
47. Bartsch de Torres, C. Renschb, T. Thelemannc, J. Müller, M. Hoffmann. Fully Integrated Bridge-type Anemometer in LTCC-based Microfluidic Systems Advances [Электронный ресурс] // Science and Technology. – 2008. – Vol. 54. – P. 401–404. – Режим доступа : <http://www.scientific.net>.
48. Маргелов А. Датчики расхода газа компании Honeywell [Электронный ресурс] / А. Маргелов // Chip News. – 2005. – № 9 (102). – С. 56–58. – Режим доступа до журн. : www.chip-news.ru.
49. N.-T. Nguyen, W. Dotzel. Asymmetrical locations of heaters and sensors relative to each other using heater arrays: a novel method for designing multi-range electrocaloric mass-flow sensors // Sensors and Actuators: A Phys. – 1997. – Vol. 62. – P. 506–512.

50. N. Sabate, J. Santande, L. Fonseca, I. Gracia, C. Cane. Multi-range silicon micromachined flow sensor // The 16th European Conference on Solid-State Transducers. – 2002. – P. 202–205.
51. Ihsan Hariadi, Hoc-Khiem Trieu, Wilfried Mokwa, Holger Vogt. M. Integrated MFlow Sensor with Monocrystalline Silicon Membrane Operating in Thermal Time-of-Flight Mode // The 16th European Conference on Solid-State Transducers. – 2002. – P. 115–116.
52. ELDRIDGE PRODUCTS INC - Thermal Gas Mass Flow Measurement and Control Instrumentation. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.cmctechnologies.com.au/index.htm>.
53. Термоанемометры Testo 405, Testo 425. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.inducr.com.ua>.
54. Y. Fang and W. W. Liou. Computations of the Flow and Heat Transfer in Microdevices Using DSMC With Implicit Boundary Conditions // J. Heat Transfer. – 2002. – Vol. 124. – P. 338–345.
55. W.W. Liou and Y. Fang. Implicit Boundary Conditions for Direct Simulation Monte Carlo Method in MEMS Flow Predictions // CMES. – 2000. – Vol. 1, No. 4, – P. 119–128.
56. Y. Weiping, L. Chong, L. Jianhua, M. Lingzhi and N. Defang. Thermal distribution microfluidic sensor based on silicon // Sensors and Actuators B. – 2005. – Vol. 108. – P. 943–946.
57. Koji Takahashi, Taku Higuchi, Yohei Ito, Tatsuya Ikuta, Kunihiro Nagayama. Study on Local Heat Transfer of Nano Fluidic Sensor // Proceedings of the 23rd sensor symposium. – 2006. – P. 279–282.
58. Knauss H., Gaisbauer U., Wagner S., Buntin D., Maslov A., Smorodsky B., Betz J. Calibration experiments of a new active fast response heat flux sensor to measure total temperature fluctuations. Part I. Introduction to the problem // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research.: Proc. Pt. III. Novosibirsk. – 2002. – P. 85–91.
59. Knauss H., Gaisbauer U., Wagner S., Buntin D., Maslov A., Smorodsky B., Betz J. Calibration experiments of a new active fast response heat flux sensor to measure total temperature fluctuations. Part III. Heat flux density determination in a short duration wind tunnel // Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research. : Proc. Pt. III. Novosibirsk. – 2002. – P. 102–112.
60. G. Kaltsas, D. Goustouridis, A. G. Nassiopoulou, D. Tsoukalas, S. Chantzandroulis. Flow study in both turbulent and laminar flow

- with a system of thermal flow and capacitive pressure sensors. – Режим доступу : <http://www.imel.demokritos.gr>.
61. G. Kaltsas, A. A. Nassiopoulou and A. G. Nassiopoulou. Characterization of a Silicon Thermal Gas-Flow Sensor With Porous Silicon Thermal Isolation // IEEE Sensors Journal. – 2002. – № 5. – P. 22–29.
 62. Y. Mo, Y. Okawa, K. Inoue and K. Natukawa, Low-voltage and low- power optimization of micro-heater and its on-chip drive circuitry for gas sensor array // Sensor and Actuators A. – 2002. – Vol. 100. – P. 94–101.
 63. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов. Компоненты и технологии. [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.compitech.ru>.
 64. Циделко В.Д.. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання. / Циделко В.Д., Яремчук Н. А. – К. : ІВЦ Політехніка, 2002. – 176 с.
 65. Програма теплового розрахунку SEMISEL 3.1. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://www.tsdrive.com.ua>.
 66. Calandra E. F. Introduction to PSPICE Using ORCAD for Circuits and Electronics // Circuits and Devices Magazine, IEEE. – 2005. – Vol. 21, No. – P. 26–27.
 67. Micro-Cap 7.0, 8.0, 9.0 Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. Spectrum Software. 2001, 2005, 2008. [Електронний ресурс] – Режим доступу : www.spectrum-soft.com.
 68. Desing J., Lindgren P. Sensor communication technology towards ambient intelligence // Measurement Science and Technology. – 2005. – Vol. 16. – P. 37–46.
 69. Десинг Й. Технология связи датчиков для создания окружающего интеллекта / Й. Десинг, П. Линдгрэн // Датчики и системы. – 2005. – № 12. – С. 63–74.
 70. Dusad S., Diggavi S.N., Al-Dhahir N., Calderbank A. R. Diversity Embedded Codes: Theory and Practice // IEEE Journal of selected topics in signal processing. – 2008. – Vol. 2, No. 2. – P. 202–219.
 71. Naffziger S. Microprocessors of the future: Commodity or engine growth? // Solid-State Circuits Magazine, IEEE. – 2009. – Vol. 1, No. 1. – P. 76–82.
 72. Intelligent instrumentation products. The Handbook of Personal Computer. Instrumentation for Data Acquisition. Test. Measure-

- ment and Control. – Burr-Brown Corp. and Intelligent Instrumentation Inc, 1989.
73. John Brignell, Neil While. Intelligent Sensor System. – Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. IOP Publishing. 1996.
 74. Lunze J. Notion of the state in systems theory and artificial intelligence // Intelligent Systems Engineering. – 1994. – Vol. 3, No. 4. – P. 201–210.
 75. Wang Fei-Yue. Intelligent Systems in a Connected World // Intelligent Systems Engineering. 2009. – Vol. 24, No. 1. – P. 2–4.
 76. Иванов С. Ю. Анализ алгоритмов обработки информации для интеллектуальных датчиков давления / С. Ю. Иванов, Г. Е. Карталов // Измерительная техника. – 1990. – № 3. – С. 26–29.
 77. Xiao Fan Wang, Guanrong Chen. Complex networks: small-world, scale-free and beyond // Circuits and Systems Magazine, IEEE. – 2003. – Vol. 3, No. 1. – P. 6–20.
 78. Ayazifar B. Can we make signals and systems intelligible, interesting, and relevant? // Circuits and Systems Magazine, IEEE. – 2009. – Vol. 9, No. 1. – P. 16–18.
 79. Collins Luke. Cut the cord // Electronics. – 2007. – Vol. 5, No. 6. – P. 42–46.
 80. Song E.Y.; Kang Lee. Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard - What is a smart transducer? // Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE. – 2008. – Vol. 11, No. 2. – P. 11–17.
 81. Leens F. An introduction to I²C and SPI protocols // Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE. – 2009. – Vol. 12, No. 1. – P. 8–13.
 82. Gorod A., Sauser B., Boardman J. System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward // Systems Journal, IEEE. – 2008. – Vol. 2, No. 4. – P. 484–499.
 83. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю для систем реєстрації та оброблення сигналів : монографія. / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 125 с.
 84. 84. Иванов В. С. Новые решения Freescale Semiconductor для встраиваемых систем управления и сбора информации [Электронный ресурс] / В. С. Иванов, И. Н. Чепурин // Режим доступа до журн. : www.freescale.com/files/abstract/global/RUSSIA_ART_3.doc.

85. Rabaey J., Ammer J., Otis B.; Burghardt F., Chee Y.H.; Pletcher N., Sheets M., Qin H. Ultra-low-power design // *Circuits and Devices Magazine, IEEE*. – 2006. – Vol. 22, No. 4. – P. 23–29.
86. Kwong Joyce, Chandrakasan Anantha. Advances in Ultra-Low-Voltage Design // *Solid-State Circuits Newsletter, IEEE*. – 2008. – Vol. 13, No. 4. – P. 20–27.
87. Alippi C., Anastasi G., Di Francesco M., Roveri M. Energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors // *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*. – 2009. – Vol. 12, No. 2. – P. 16–23.
88. Jianyong Lin; Wendong Xiao; Lewis F.L.; Lihua Xie. Energy-Efficient Distributed Adaptive Multisensor Scheduling for Target Tracking in Wireless Sensor Networks. *Instrumentation and Measurement, IEEE*. – 2009. – Vol. 58, No. 6. – P. 1886–1896.
89. Vittoz Eric A. The Electronic Watch and Low-Power Circuits // *Solid-State Circuits Newsletter, IEEE*. – 2008. – Vol. 13, No. 3. – P. 7–23.
90. Chang-Tzu Wang; Ming-Dou Ker. Design of Power-Rail ESD Clamp Circuit With Ultra-Low Standby Leakage Current in Nanoscale CMOS Technology // *Journal of Solid-State Circuits, IEEE*. – 2009. – Vol. 44, No. 3. – P. 956–964.
91. Lhermet H., Condemine C., Plissonnier M., Salot R., Audebert P., Rosset M. Efficient Power Management Circuit: From Thermal Energy Harvesting to Above-IC Microbattery Energy Storage // *Journal of Solid-State Circuits, IEEE*. – 2008. – Vol. 43, No. 1. – P. 246–255.
92. Хоровиц П. Искусство схемотехники : в 2 т. / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1984. – 598 с.
93. Смоллов В. Б. Функциональные преобразователи информации / В. Б. Смоллов. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 248 с.
94. Алексеенко А. Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А. Г. Алексеенко, Е. А. Коломбет, Г. И. Стародуб. – М. : Радио и связь, 1985. – 256 с.
95. Бринали К. Измерительные преобразователи. Справ. пособие : пер. с англ. / К. Бринали. – М. : Мир, 1991. – 143 с.
96. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. – 304 с.

97. Коломбет Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – М. : Радио и связь, 1991. – 376 с.
98. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 303 с.
99. Куприянов М. С. Техническое обеспечение цифровой обработки сигналов. Справочник / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин, В. Е. Иванова. – СПб : Наука и техника, 2000. – 752 с.
100. Бермена Х. Прикладная лазерная медицина / Х. Бермена, Г. Мюллера. – М. : Интерэкспер, 1997.
101. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / [за ред. З. Готри, Р. Голяки]. – Львів : Вид. Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 364 с.
102. Schmalzel J.L., Rauth D.A. Sensors and signal conditioning // Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE. – 2005. – Vol. 8, No. 2. – P. 48–53.
103. Ziegler S.; Woodward R.C.; Iu H., Borle, L.J. Current Sensing Techniques: A Review // Sensors Journal, IEEE. – 2009. – Vol. 9, No. 4. – P. 354–376.
104. Dvorkind T. G.; Eldar Y. C. Robust and Consistent Sampling // Signal Processing Letters, IEEE. – 2009. – Vol. 16, No. 9. – P. 739–742.
105. Candes E.J., Wakin M.B. An introduction to compressive sampling // Signal Processing Magazine, IEEE. – 2008. – Vol. 25, No. 2. – P. 21–30.
106. Treichler J. Signal processing: A view of the future, part 1 // Signal Processing Magazine, IEEE. – 2009. – Vol. 26, No. 2. – P. 116–120.
107. Treichler J. Signal processing: A view of the future, part 2 // Signal Processing Magazine, IEEE. – 2009. – Vol. 26, No. 3. – P. 83–86.
108. Rapuano S., Daponte P., Balestrieri E., De Vito L.; Tilden S.J., Max S.; Blair J. ADC parameters and characteristics // Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE. – 2005. – Vol. 8, No. 5. – P. 44–54.
109. Fujimoto Y., Kanazawa Y., Re P.L.; Iizuka K.A. 100 MS/s 4 MHz Bandwidth 70 dB SNR Delta Sigma ADC in 90 nm CMOS // Jour-

- nal of Solid-State Circuits, IEEE. – 2009. – Vol. 44, No. 6. – P. 1697–1708.
110. Sevenhans Jan, Craninckx Jan. Europe's Analog Design Experts Convened at 16th AACD Workshop // Solid-State Circuits Newsletter, IEEE. – 2007. – Vol. 12, No. 3. – P. 30.
 111. Nauta Bram. Analog IC Design at the University of Twente // Solid-State Circuits Newsletter, IEEE. – 2007. – Vol. 12, No. 1. – P. 5–10.
 112. Gang Liu, Haldi P., Tsu-Jae King Liu, Niknejad A.M. Fully Integrated CMOS Power Amplifier With Efficiency Enhancement at Power Back-Off // Journal of Solid-State Circuits, IEEE. – 2008. – Vol. 43, No. 3. – P. 600–609.
 113. Ferreira L., Pimenta T., Moreno, R. CMOS implementation of precise sample-and-hold circuit with self-correction of the offset voltage // Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings. – 2005. – Vol. 152, No. 5. – P. 451–455.
 114. Chih-Wen Lu. A Rail-To-Rail Class-AB Amplifier With an Offset Cancellation for LCD Drivers // Journal of Solid-State Circuits, IEEE. – 2009. – Vol. 44, No. 2. – P. 525–537.
 115. Rashidzadeh R.; Muscedere R.; Ahmadi M.; Miller W. C. A Delay Generation Technique for Narrow Time Interval Measurement // Instrumentation and Measurement, IEEE. – 2009. – Vol. 58, No. 7. – P. 2245–2252.
 116. Lin B.R., Huang C.L. Analysis and implementation of a novel soft-switching pulse-width modulation converter // Power Electronics, IET. – 2009. – Vol. 2, No. 1. – P. 90–101.
 117. Zero-Drift Single-Supply Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier AD8551/52/54. Data sheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа : www.analog.com.
 118. General-Purpose CMOS Rail-to-Rail Amplifiers AD8541/42/44. Data sheet. [Электронный ресурс] – Режим доступа : www.analog.com.
 119. R. Kersjes, F. Lienscher, E. Spiegel, Y. Manoli, W. Mokwa. An invasive catheter flow sensor with on-chip CMOS readout electronics for the on-line determination of blood flow // Sensors and Actuators A: Phys. – 1996. – Vol. 54. – P. 563–567.
 120. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А. А. Чернышев, В. И. Иванов, А. И. Аксенов, Д. Н. Глушкова. – М. : Энергия, 1980. – 216 с.

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.