

УДК 621.317.2

О.В. Борисов, канд. техн. наук, І.С. Дейнека, Б.І. Лупина

## **Автоматизований стенд на основі плати збору даних NI USB-6009 для вимірювання статичних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача**

Описана архітектура апаратної частини, програмне забезпечення та інтерфейс користувача автоматизованого стенда для визначення статичних параметрів терморезисторного перетворювача. Приведена конструкція мікромеханічного мембранного елемента прямого та косвенного розігріву, проаналізовані його основні параметри. Представлені характеристики терморезисторного перетворювача, отримані та досліджені з допомогою описуваного стенда.

The hardware architecture, software and user's interface of the automated stand for determination of static parameters of resistive temperature transducer are described. The structure of directly and indirectly heated micro-mechanical resistive membrane element and its basic parameters are specified. The measured with the designed stand transducer's characteristics are presented and analyzed.

### **Вступ**

В процесі розробки терморезисторних первинних перетворювачів (ТРП) фізичних величин та їх виготовлення за технологією мікро-електромеханічних систем (МЕМС) на кремнії виникає необхідність в проведенні великих обсягів контрольних-вимірювальних операцій [1]. Їх виконання бажано перекласти на автоматизовані стенди з використанням персонального комп'ютеру (ПК) для задавання робочих електричних режимів перетворювача, збору, обробки і аналізу отриманої інформації, за можливості – для управління вимірювальними процесами. Аналіз чисельних наукових публікацій на цю тему показує перспективність використання в апаратній частині стенду промислових плат збору даних, до складу яких входять підсилювачі вимірюваного сигналу з програмно керованим коефіцієнтом перетворення, багатоканальні аналого-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі (АЦП і ЦАП), вбудований комп'ютерний інтерфейс. Оптимальним програмним середовищем для розв'язку подібних задач визнано середовище графічного програмування LabVIEW. Вибравши плату збору даних виробництва фірми National Instruments, розробник позбавлений необхідності написання

драйверу пристрою (програмне забезпечення NI-DAQmx driver software входить в комплект постачання плати збору даних від виробника апаратної частини). Додаткова перевага такого вибору полягає також у можливості вільного доступу до реалізованих проектів із бібліотечного ресурсу LabVIEW [2]. Навантажувальна здатність шини USB персонального комп'ютеру і наявність джерела вторинного живлення для зовнішніх пристроїв +5В, 200 мА в платах збору даних NI USB-6009 надає можливість проектувати пристрій як "Bus powered device" без додаткового мережевого блоку живлення.

Метою роботи є розробка автоматизованого апаратно-програмного стенду для вимірювання електричних і температурних параметрів МЕМС ТРП відповідно до сучасних уявлень про архітектуру апаратної частини таких пристроїв, досягнутого рівня розвитку техніки у вказаному напрямку, вимог діючих в Україні та міжнародних нормативних документів. Ринкові пропозиції готових рішень (наприклад, комплект на платформі NI ELVIS II включає низку віртуальних електровимірювальних приладів, генераторів, аналізаторів тощо) поставляються з закритим програмним кодом, що позбавляє розробника можливості вирішення власної нестандартної прикладної задачі. Особливо гостро проблема гнучкості архітектури вимірювального стенду стоїть перед розробниками первинних перетворювачів фізичних величин, для яких набір параметрів не завжди стандартизований.

### **Структурна схема автоматизованого стенду для вимірювання параметрів терморезисторних перетворювачів**

На рис.1 наведено блок-схему стенду для вимірювання параметрів ТРП. До його складу входять наступні функціональні вузли:

- 1 - досліджуваний зразок – МЕМС ТРП;
- 2 - електрична схема управління первинним МЕМС-ТРП з елементами живлення на DC-DC перетворювачі AIMTEC типу «AM1L-0515D-NZ» (2.1) та буферними повторювачами на основі операційних підсилювачів КР140УД17А (2.2);
- 3, 4 – контрольний вимірювач температури оточуючого середовища моделі КІМО VT-200 з термометром опору Pt-100;

5 - плата збору даних NI USB-6009 виробництва National Instruments;

6 - ПК з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW.

Зовнішній вигляд стенду представлено на рис. 2 (нумерацію складових елементів подано у відповідності до блок-схеми рис. 1).

Досліджуваний зразок ТРП під'єднується до електричної схеми вто-ринного перетворювача, яка зкомутувана з аналоговими портами вводу-виводу плати збору інформації та надалі через шину USB - з персональним комп'ютером (ПК). Електрична схема реалізує підключення резисторів досліджуваного ТРП послідовно з

постійними прецизійними резисторами типу С2-29В-0,125, допустиме паспортне відхилення опору яких від номінального значення не перевищує  $\pm 0,25\%$ . Це робить можливим більш прецизійне визначення величини струмів, що протікають через активні елементи ТРП, та напруг на них завдяки використанню 14-розрядних АЦП з типовою абсолютною похибкою вимірювання  $\pm 2,56$  мВ для діапазону вхідного диференціального сигналу  $\pm 2,5$  В (тоді як програмне задавання напруги аналогових виходів NI USB-6009 виконується з використанням 12-розрядних вбудованих ЦАП з типовою паспортною абсолютною похибкою вихідної напруги  $\pm 7$  мВ).

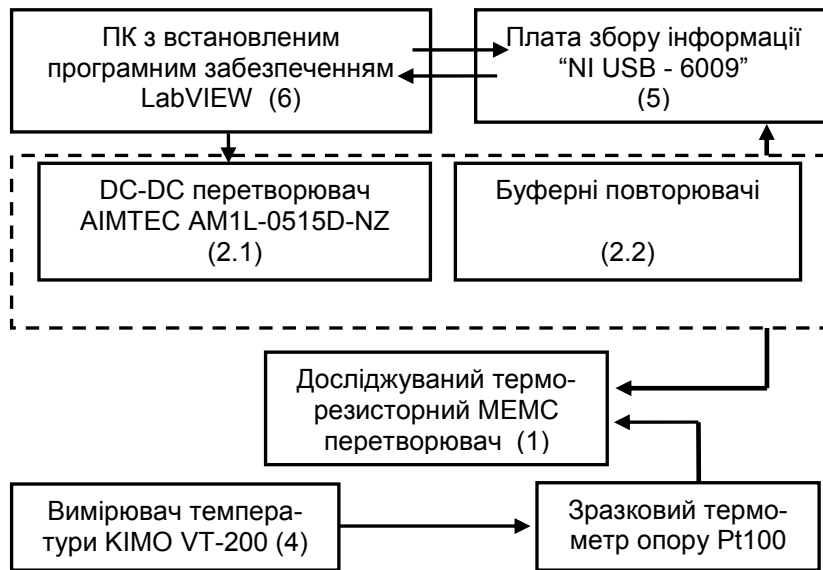


Рис. 1. Схематичне зображення автоматизованого стенду

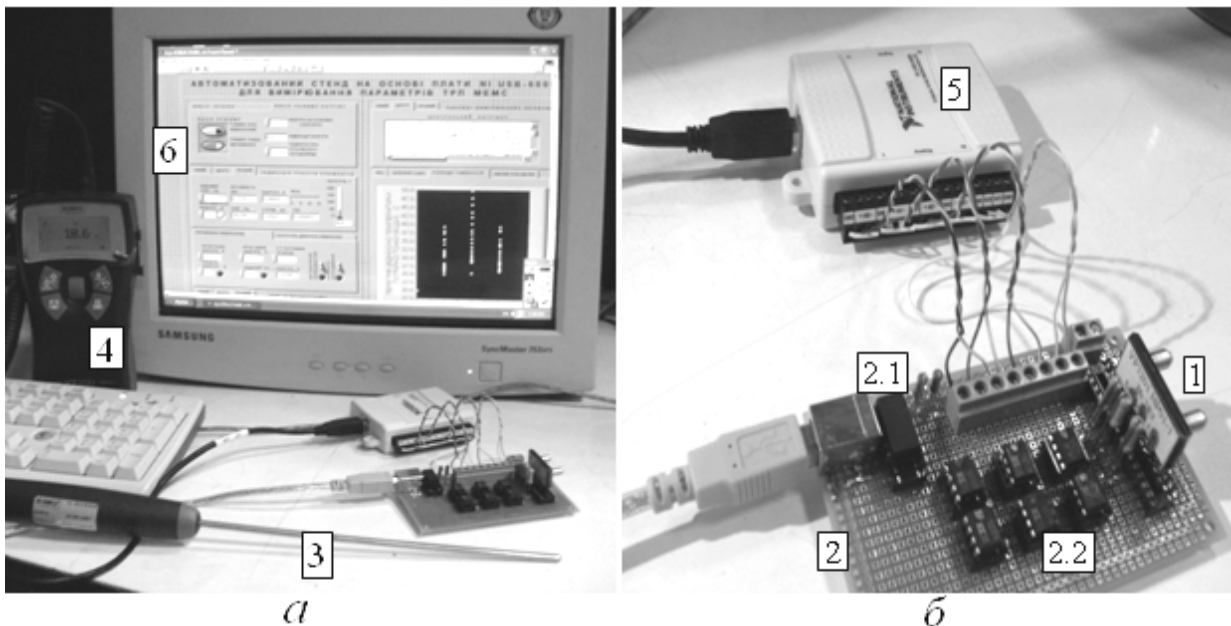


Рис. 2. Загальний вигляд автоматизованого стенду (а) та збільшене зображення електричної схеми і плати збору даних (б)

Схема зміщення вимірюваного сигналу на вході комутатору NI USB-6009 визначає вхідний опір його аналогових входів на рівні 144 кОм. Для запобігання додаткової похибки вимірювання за рахунок протікання вхідного струму аналогових портів плати NI USB 6009 через досліджувані елементи схеми авторами використовуються буферні повторювачі напруги на базі прецизійних операційних підсилювачів KP140УД17А. Блок живлення досліджуваних ТРП і схеми вторинного перетворювача реалізовано на DC-DC – перетворювачі з двополярним виходом типу AM1L-0515D-NZ, на вхід якого подається напруга +5В шини USB персонального комп'ютера (навантажувальна здатність шини – 100 мА, перетворювача - до 33 мА). Отримані від вторинного перетворювача аналогові сигнали поступають на плату NI USB 6009, обробляються та через USB - інтерфейс надходять до ПК з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW.

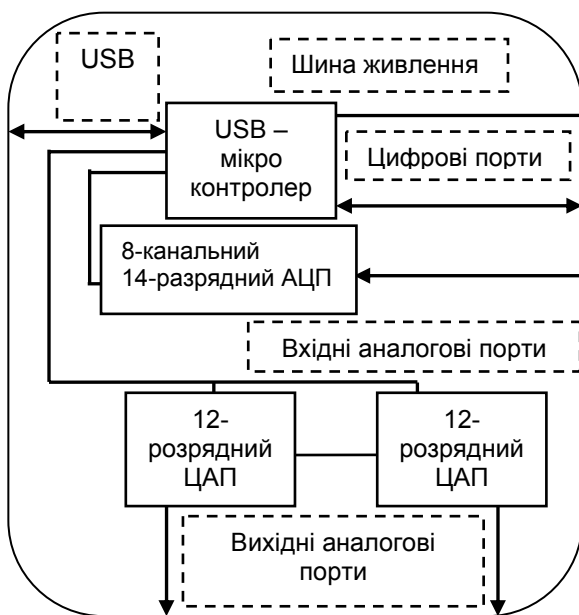


Рис. 3. Блок-схема плати збору даних NI USB-6009

Блок – схема пристрою збору даних NI USB-6009 наведена на рис.3. Він містить 8 каналів аналогового вводу, 2 канали генерації аналогового сигналу, 12 каналів цифрового вводу-виводу та 32-розрядний лічильник і приєднується до персонального комп'ютера за допомогою інтерфейсу full-speed USB.

#### Конструкція досліджуваного мікроемеханічного терморезисторного мембранного елемента

Основою конструкції виготовлених за MEMC-технологією термо-резисторних вимірювальних перетворювачів є кристал монокристалічного

кремнію з набором тонкоплівкових вимірювальних металевих резисторів, розміщених на діелектричній мембрані. Конструкція та технологічні аспекти виготовлення подібних мембранних структур детально викладені в попередніх публікаціях авторів [3]. Нагрівачем в перетворювачі може виступати кожен з резисторів при пропусканні через нього заданого електричного струму. При певному розподілі потужності між резисторними елементами частина з них використовується у якості активних нагрівачів, а частина - як пасивні вимірювачі температури, реалізуючи електротеплові режими перетворювачів прямого і непрямого (стороннього) нагрівання.

Функція вимірювального перетворення активного ТРП як елемента електричного кола ґрунтується на двох факторах:

- можливості активного управління температурою складових терморезисторів шляхом пропускання через них електричного струму;
- однозначній залежності електричного опору від температури.

Зміна початкового просторового розподілу температури в середовищі поблизу нагрівача під впливом вимірювального фактору (наприклад, при наявності масопереносу всередині корпусу або зміні теплопровідності оточуючого середовища) викликає відповідну зміну електричного опору резисторних елементів. Таким чином, вимірювальний процес фактично зводиться до задавання теплових робочих режимів активних нагрівачів і визначення їх власного електричного опору або опору сусідніх з ними пасивних резисторних перетворювачів в залежності від інтенсивності вхідного впливу і потужності, що розсіюється на центральному нагрівачі.

На рис. 4(а) наведено ескіз досліджуваного тонкоплівкового терморезисторного мембранного елемента (ТМЕ), виготовленого за MEMC технологією, змонтованого на підкладці і розміщеного в потокоформу-ючому каналі проточного перетворювача диференціального тиску газу термоанемометричного типу. До складу ТМЕ входять три планарні нікелеві резисторні елементи з шириною  $b=40$  мкм, довжиною  $L=800$  мкм, розміщені на діелектричній  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  мембрані з розмірами  $0.5$  мм  $\times$   $1$  мм загальною товщиною близько  $0,4$  мкм. Відстань між елементами  $d=80$  мкм. Мембрану виготовлено методом хімічного травлення кремнію зі зворотної сторони кремнієвої пластини орієнтації  $\langle 100 \rangle$ .

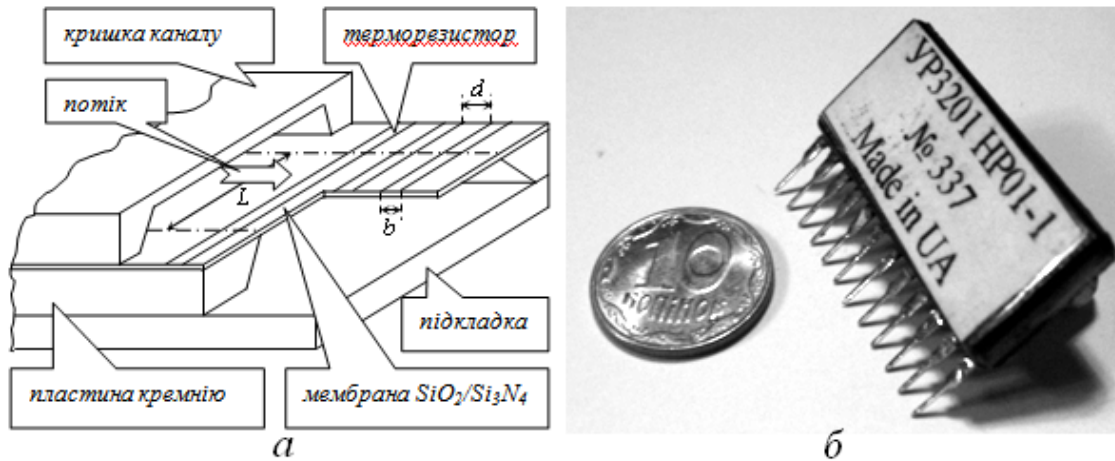


Рис. 4. Фрагмент структури ТРП УР3201 (а) та його зовнішній вигляд (б)

### Діючі нормативні документи і розрахункові формули

Перелік та методику вимірювання метрологічних параметрів ТРП визначають положення наступних нормативних документів: ДСТУ 2858-94 «Термоперетворювачі опору» [4] і ГОСТ 28626-90 (МЕК 696-81) «Термо-резисторы косвенного подогрева». ДСТУ 2858-94 регламентує статичні характеристики традиційних об'ємних ТРП, основними з яких є номінальні значення опору при  $0^{\circ}\text{C}$ , номінальна статична характеристика (НСХ) у вигляді поліноміальних рівнянь залежності опору перетворювача від температури, діапазон вимірюваних температур, граничне відхилення від НСХ. Функціональний зв'язок між електричним опором і температурою для платиного ТРП визначається рівнянням Каллендара-ван-Дьюзена – поліноміальною залежністю другого порядку, регламентованою [4]:

$$R_{T \text{ Pt}} = R_0 \left( 1 + A_{\text{Pt}} T + B_{\text{Pt}} T^2 \right), \quad (1)$$

де  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{T \text{ Pt}}$  – опір платиного резистору при температурі  $T$ ,  $[\text{Om}]$ ;  $R_0$  – опір при температурі  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $A_{\text{Pt}} = 3,9692 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ ;  $B_{\text{Pt}} = -5,8290 \cdot 10^{-7} [^{\circ}\text{C}^{-2}]$ . Опір нікелевих дротяних ТРП в діапазоні температур ( $-60^{\circ}\text{C} - +100^{\circ}\text{C}$ ) характеризується аналогічною до (1) залежністю від температури з коефіцієнтами  $A_{\text{Ni}} = 5,4963 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$ ,  $B_{\text{Ni}} = 6,7556 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}^2$ . Розв'язавши (1), маємо значення температури:

$$T(R_T) = \frac{A}{2B} \left( \sqrt{1 + \frac{4B}{A^2} \left( \frac{R_T - R_0}{R_0} \right)} - 1 \right). \quad (2)$$

У незначному діапазоні зміни лінійне наближення залежності опору металів від температури часто задовольняє метрологічним вимогам і дозволяє отримати спрощені аналітичні вирази.

У цьому випадку залежність (1) лінеаризується, а замість поліноміальних коефіцієнтів можна користуватися температурним коефіцієнтом опору (ТКО)  $\alpha [1/^{\circ}\text{C}]$ , який визначається із наступного співвідношення:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0}. \quad (3)$$

В результаті залежність (2) також істотно спрощується і може бути визначена із вимірних значень струму через резисторний елемент  $I$  та падіння напруги  $U$  на ньому:

$$T(R_{T \text{ Pt}}) = \frac{U/I - R_0}{\alpha R_0}. \quad (4)$$

ГОСТ 28626-90 (МЕК 696-81) додатково вводить такі терміни та визначення для параметрів терморезистору непрямого нагрівання:

1. Вольт-амперну характеристику в умовах усталеного режиму пропускання струму через нагрівач після досягнення теплової рівноваги перетворювача з непорушним навколишнім середовищем;

2. Сталу розсіювання чутливого елемента  $G_{th} [\text{Вт}/^{\circ}\text{C}]$ , яка визначається із виразу:

$$G_{th} \cdot (T - T_{\text{н.с.}}) = P, \quad (5)$$

де  $P$  – розсіювана на елементі електрична потужність,  $T_{\text{н.с.}}$  – температура навколишнього середовища. Типові значення сталої розсіювання для об'ємних перетворювачів загальнопромислового призначення в повітрі за нормальних умов складають величину порядку  $G_{th} \approx 30 - 60 [\text{мВт}/^{\circ}\text{C}]$ ;

3. Теплову ефективність нагрівача  $\chi [\%]$  – відношення електричних потужностей, які розсіюються відповідно на чутливому елементі

та на нагрівачеві і призводять до однакового розігрівання чутливого елемента.

**Програмне забезпечення стенду**

Для обробки, зберігання та відображення даних, які поступають через USB-інтерфейс на комп'ютер, авторами створено програму у пакеті LabView 8.5, спрощений графічний код якої наведено на рис. 5. Програмний код являє собою сукупність іконок підпрограм, поєднаних між собою відповідними логічними зв'язками. Алгоритм функціонування наведеного на рис.5 програмного коду реалізується наступним чином. З відповідних вхідних фізичних каналів плати NI USB-6009 за допомогою елемента DAQ Assistant [5] вимірюються напруги на резисторах ТРП та на ввімкнених послідовно з ними прецизійних резисторах.

Сигнали розділяються вузлом Split signals та поступають до підпрограми Amplitude and Level Measurements, яка виконує дискретизацію вхідних аналогових напруг 14-розрядними АЦП. Шляхом програмних перетворень вимірних напруг з використанням вбудованих функцій Subtract, Multiply,

Divide визначаються поточні значення активних опорів і температури елементів перетворювача і розсіювані на кожному з них потужності. Чисельні значення вказаних величин виводяться на передню панель програми, заносяться до таблиці програмним вузлом Build Table і використовуються для побудови відповідних графіків. Для зручності обробки отриманих результатів у програмі передбачено збереження файлів даних у форматі Excel (підпрограма Write to spreadsheet file). Для цього достатньо вказати ім'я файлу, до якого треба зберегти результати досліджень; програма автоматично перетворює їх на масив даних (підпрограма Convert from dynamic data) та записує до вказаного файлу. Зупинка програми відбувається автоматично за умови досягнення напруги на резисторі ТРП заданого користувачем максимально допустимого значення або вручну за допомогою кнопки Stop. Побудову графіків покладено на підпрограму Build XY Graph. На рис. 5 не розкрито структуру підпрограм, живлення резисторів ТРП, розрахунку ТКО, побудови розподілу температур елементів ТРП на мембрані, вибору режиму нагріву та номера зразка, які показані у вигляді відповідних іконок.

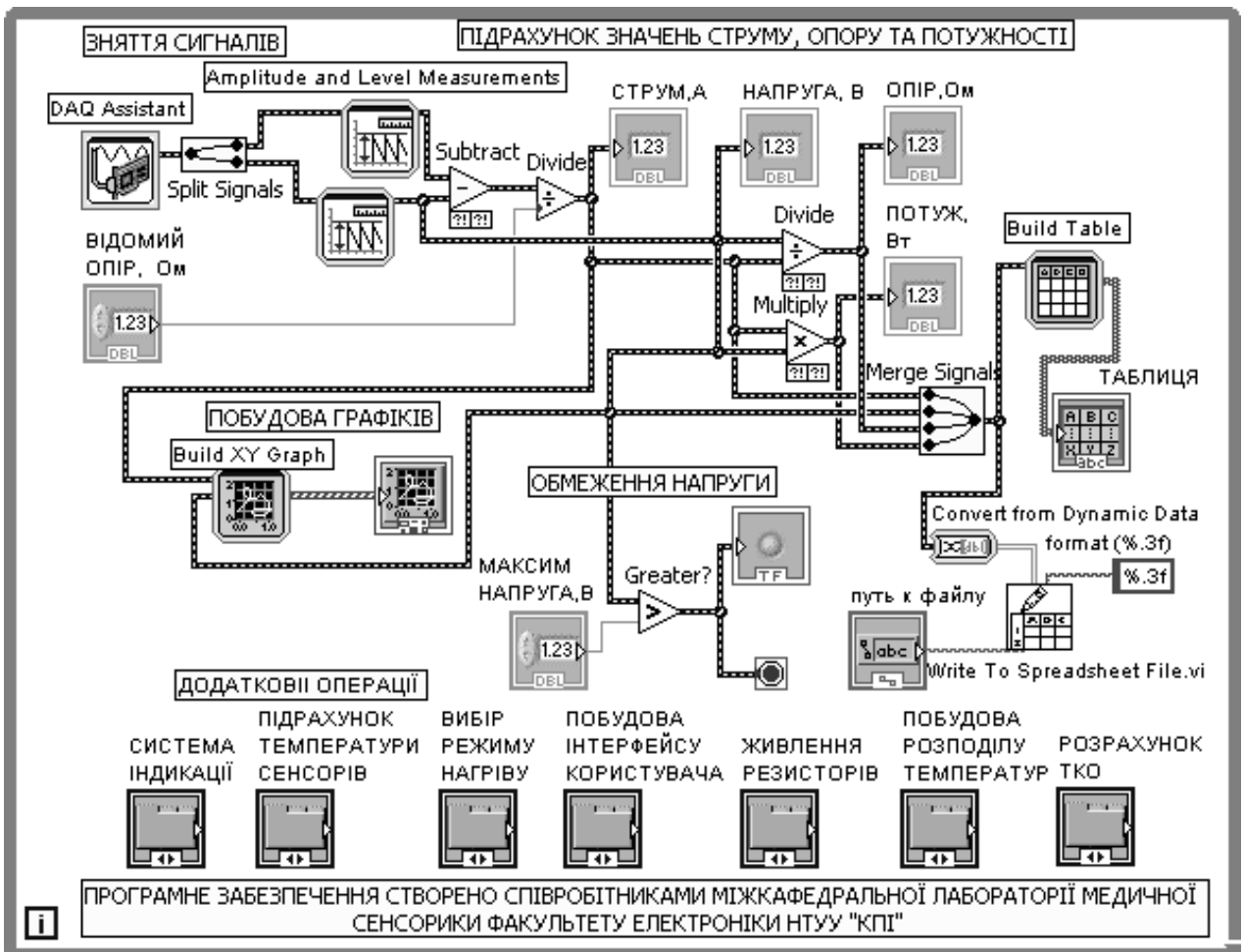


Рис. 5. Спрощений графічний програмний код автоматизованого стенду для вимірювання базових характеристик МЕМС ТРП

Розроблена програма забезпечує:

- 1- Можливість задавання електричних режимів і розподілу потужностей між резисторними елементами досліджуваного зразка.
- 2- Можливість автоматичного підрахунку ТКО нагрівачів за вказаними значеннями їх опорів в двох температурних точках.
- 3- Можливість задавання діапазону вихідної напруги ЦАП, величину її зміни між вимірювальними точками, максимальне значення напруги на кожному з нагрівачів, координати нагрівачів в каналі по його довжині.
- 4- Виведення на передню панель "віртуального приладу" поточних чисельних значень безпосередньо вимірюваних або програмно обчислених параметрів: напруги на кожному з нагрівачів, струму через них, опору кожного нагрівача, потужності, що розсіюється на нагрівачах, температури їх перегріву відносно температури оточуючого середовища.
- 5- Виведення на передню панель програми графіків отриманих вольт-амперних характеристик і залежності температури перегріву окремих елементів досліджуваних перетворювачів від розсіюваної потужності.
- 6- Контроль діапазону безпечного перегрівання нагрівачів та автоматичної зупинки роботи стенду при досягненні напруги на одному з нагрівачів попередньо заданого максимально допустимого значення.

7- Можливість запису вказаних у п.6 таблиць до текстового редактора або до пакету Microsoft Excel

### Інтерфейс користувача

Інтерфейс користувача - передня панель віртуального приладу - розроблено в програмному середовищі LabView 8.5 із можливістю задавання умов дослідження і контролю поточних параметрів (рис. 6.). В лівій частині панелі розташовані елементи управління та індикації (віртуальні перемикачі та індикатори), в правій - результати досліджень.

### Результати роботи

Для експериментальної перевірки похибки вимірювання спроектованим автоматизованим стендом у діапазоні струмів збудження до 7 мА авторами виконано вимірювання активного опору прецизійних резисторів типу С2-29В-0,125 номіналами  $124\text{Om}\pm 0,25\%$  і  $221\text{Om}\pm 0,25\%$ . Абсолютне значення відхилення вимірюваного значення опору резисторів від паспортного не перевищує  $\pm 0,4\text{Om}$ , що відповідає похибці вимірювання температури досліджуваних МЕМС ТРП в межах  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Проведено вимірювання статичних параметрів вітчизняних МЕМС ТРП УР3201, отримані їх вольт-амперні (рис. 7а) та градус-ватні (рис. 7б) характеристики.

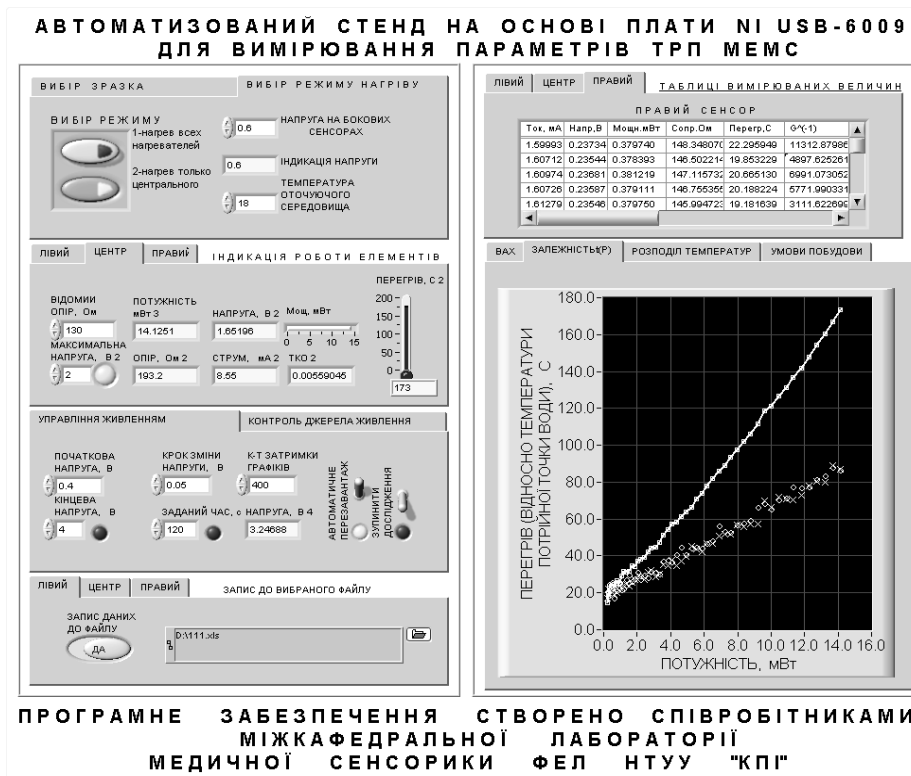


Рис. 6. Передня панель автоматизованого стенду для вимірювання характеристик МЕМС ТРП

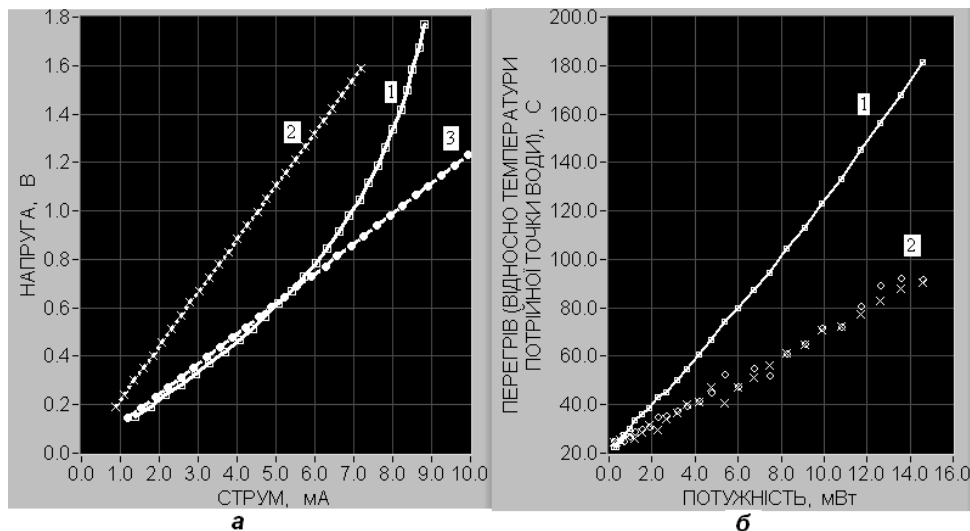


Рис. 7. а - Вольт-амперні характеристики центрального нагрівача МЕМС ТРП (1) і резисторів С2-29В номіналами R1=221Ом (2) та R2=124Ом (3); б - Характеристики розігріву центрального (крива 1 – прямий розігрів) та бокових (2 – непрямий розігрів) резисторних елементів МЕМС ТРП

При розсіюванні на центральному нагрівачі потужності 17мВт його температура перегріву в непорушному повітрі за нормальних умов становить 160 °С, що відповідає сталій розсіювання потужності порядку  $G_{th} \approx 10^{-4}$  Вт/°С. При цьому різниця температур між центральним та боковими нагрівачами, розташованими на міжцентровій відстані 100 мкм, близько 100°С; відповідно градієнт температур в площині мембрани ТРП становить понад  $10^3$  °С/мм. Теплова ефективність нагрівача по відношенню до резисторів непрямого нагрівання становить величину порядку  $\chi = 30\%$ . Наведені чисельні значення параметрів не поступаються зразкам МЕМС ТРП, розроблених в провідних наукових установах світу [1, 6].

## Висновки

1. Розроблено автоматизований стенд для вимірювання основних статичних параметрів МЕМС ТРП. Експериментально визначена похибка вимірювання активного опору дозволяє розраховувати на похибку визначення температури складових елементів ТРП в межах  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

2. Проведені дослідження МЕМС ТРП вітчизняного виробництва, наведені їх основні статичні характеристики в повітрі за нормальних умов. Чисельні значення отриманих параметрів свідчать про перспективність використання ТРП у якості сенсорів потоку або диференційного тиску.

## Література

1. Kozlov A.G. Analytical modeling of steady-state temperature distribution in thermal micro-sensors using Fourier method. Part 2: Practical application // Sensors and actuators, 101 (2002), p. 299-310.
2. <http://www.ni.com/solutions>
3. Б.І. Лупина, О.В. Борисов, В.Ф. Заворотний, І.І. Кацан, С.М. Осинів "Моделювання та оптимізація конструкції мікромеханічного терморезисторного перетворювача", 2-й Міжнародний радіоелектронний форум "Прикладна радіоелектроніка. Состояние и перспективы развития". Харьков, Украина, 19-23 сентября 2005 г. Том 3, с. 240-243.
4. Перетворювачі опору. Загальні технічні вимоги та методи випробувань: ДСТУ 2858-94. – [чинний від 23 листопада 1994 р]. – К.: Держспоживстандарт України, 1994 – 106 с. – (Національні стандарти України)
5. Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.
6. Svetovoy V.B., Winter I.A. Model of the m-flown microphone // Sensors and actuators, 86 (2000), p. 171-181.