

Твердотельная электроника

УДК 621.317.2, 621.3.084.2

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

Вимірювання динамічних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача з використанням програмно-апаратного комплексу NI Elvis II

Измерены динамические параметры микромеханического терморезисторного преобразователя прямого разогрева в различных средах. Описаны архитектура аппаратной части разработанного автоматизированного стенда на основе программно-аппаратного комплекса NI Elvis II, программное обеспечение и интерфейс пользователя в среде LabVIEW. Проанализированы результаты измерения характеристик терморезисторного преобразователя, полученные с помощью предложенного стенда.

The dynamic parameters of micromechanical thermo-resistive directly heated converter are measured in different mediums. The hardware architecture of the designed automated stand on the base of the hardware-software complex NI Elvis II, software and user's interface into LabVIEW environment are described. The results of thermo-resistive transducer's characteristics measurement, received with the proposed stand, have analyzed.

Ключевые слова: *микромеханический терморезисторный преобразователь, программно-аппаратный комплекс NI Elvis II, автоматизированный стенд.*

Вступ

Використання терморезисторних перетворювачів (ТРП) фізичних величин у режимі живлення змінним струмом дозволяє підвищити інформативність вихідного сигналу та знизити похибку вимірювання. На основі аналізу публікацій [1, 2] можна стверджувати, що сучасні методики вимірювання параметрів газового середовища або рідини базуються на аналізі процесів теплообміну чутливого елемента з навколишнім середовищем під час живлення нагрівачів змінним струмом або під час реєстрації перехідних теплообмінних процесів. В обох випадках необхідне попереднє визначення динамічних параметрів ТРП, до яких відносяться динамічний електричний опір R_{Td} , динамічний коефіцієнт розсіяння потужності G_{thD} , теплоємність чутливого елемента C_{th} , динамічний множник D ,

теплова τ_{th} та електрична τ_{el} сталі часу. Визначення більшості вказаних параметрів для обраного вимірюваного середовища можливе шляхом отримання залежностей електричного опору активних нагрівачів і пасивних вимірювачів температури від часу при ступінчастій зміні електричної потужності, що розсіюється на нагрівачі. Числові значення сталої часу елементів сучасних ТРП, виготовлених за технологією мікроелектромеханічних систем (MEMS) на кремнії, становлять одиниці мілісекунд, а теплоємність елементів ТРП – порядку $10^{-8} \dots 10^{-6}$ Дж/°С. За таких значень сталої часу та теплоємності можна отримати швидкість зміни температури окремих елементів ТРП понад 10^5 °С/с на нагріванні і охолодженні [3].

Наведені вище числові значення параметрів ТРП, виготовлених за технологією MEMS, вказують на проблематичність використання традиційних методик їх вимірювання, визначених чинними нормативними документами [4], і на необхідність застосування швидкодіючих автоматизованих програмно-апаратних засобів. Обравши програмно-апаратний комплекс NI Elvis II за основу автоматизованого стенду для дослідження динамічних параметрів ТРП, розробник первинного перетворювача уникає потреби написання власного драйверу пристрою та має вільний доступ до бібліотек програм виробника апаратної частини з відкритим програмним кодом у середовищі графічного програмування LabVIEW [5]. До того ж до складу програмно-апаратного комплексу NI Elvis II входять підсилювачі вхідних сигналів з програмно-керованим коефіцієнтом підсилення, високорозрядні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП), генератор сигналів спеціальної форми, регульовані джерела постійної напруги, вбудований USB-інтерфейс, що розширює можливості розробки спеціалізованих вимірювальних стендів з програмно-керованою гнучкою архітектурою.

Дана робота присвячена визначенню динамічних параметрів ТРП, виготовлених за технологією MEMS, в різних середовищах з використанням сучасних програмно-апаратних засобів.

1. Динамічні параметри терморезисторних перетворювачів

Традиційно динамічними параметрами прийнято вважати такі, що характеризують перехідні електричні і теплові процеси. Вони не обов'язково повинні явно визначати часові характеристики перетворювача; деякі з них (наприклад, динамічний опір і динамічний коефіцієнт розсіяння потужності) можуть бути розраховані з статичної вольт-амперної характеристики. Динамічний опір R_{Td} визначається похідною від напруги за струмом у вибраній робочій точці вольт-амперної характеристики. Динамічний коефіцієнт розсіяння потужності G_{thD} також розраховують в конкретній робочій точці за нахилом дотичної до кривої залежності різниці температур ΔT чутливого елемента та навколишнього середовища від розсіюваної на нагрівачі електричної потужності розігрівання P . Величина G_{thD} залежить від термодинамічних параметрів матеріалів перетворювача і навколишнього середовища, геометричних розмірів об'єктів теплообміну, наявності масопереносу всередині каналу. Завдяки цьому реалізується вимірювальний механізм активного ТРП в статичному режимі. У попередній роботі авторів [6] експериментально підтверджено, що для перегрівів елементів ТРП не більше 180°C їх градус-ватні характеристики є практично лінійними, тому виправдано використання єдиного значення коефіцієнта розсіяння, чисельно рівного статичному коефіцієнту розсіяння G_{th} .

Теплоємність чутливого елемента перетворювача визначається через кількість тепла, що акумулюється в елементах його конструкції, при зміні температури на 1°C . Для ТРП, виготовлених за технологією МЕМС, розрахунок вказаного параметру вимагає уточнення, оскільки теплоємність навколишнього середовища, яке бере участь в теплообмінних процесах, може бути одного порядку з теплоємністю елементів конструкції первинного перетворювача або навіть значно перевищувати її, що характерно для дослідження параметрів рідини. Для місткового нікелевого ТРП товщиною $0,1\ \mu\text{м}$ на діелектричній підкладці $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ шириною $40\ \mu\text{м}$, товщиною $0,3\ \mu\text{м}$ і довжиною $1\ \text{мм}$ сумарна розрахункова теплоємність містка становить близько $4 \cdot 10^{-8}\ \text{Дж}/^\circ\text{C}$. При розміщенні такого первинного перетворювача у вимірювальному каналі висотою $100\ \mu\text{м}$ теплоємність повітряного середовища, яке зазнає теплового збудження містком під час нагрівання в процесі вимірювання, за нормальних умов становитиме

близько $7 \cdot 10^{-9}\ \text{Дж}/^\circ\text{C}$, теплоємність етилового спирту $96\ \%$ в каналі над нагрівачем – $7,6 \cdot 10^{-6}\ \text{Дж}/^\circ\text{C}$, води – $16 \cdot 10^{-6}\ \text{Дж}/^\circ\text{C}$.

Згідно з роботою [4] теплоємність чутливого елемента ТРП C_{th} є розрахунковим параметром, що визначається добутком теплової сталої часу τ_{th} , с, і коефіцієнта розсіяння G_{th} , $\text{Вт}/^\circ\text{C}$:

$$C_{th} = \tau_{th} \cdot G_{th}. \quad (1)$$

Отже, методи визначення теплової сталої часу первинного перетворювача можна застосовувати і для визначення його теплоємності за умови, що коефіцієнт розсіяння відомий.

Динамічний множник D відображає внутрішні електричні і теплові зворотні зв'язки перетворювача в конкретному режимі живлення та пов'язує швидкість встановлення температурної рівноваги чутливого елемента перетворювача зі швидкістю встановлення електричної робочої точки. Динамічний множник визначається за виразом [7]:

$$D = -\frac{P}{R_T} \frac{dR_T}{dP} = \frac{R_T - R_{Td}}{R_T + R_{Td}}, \quad (2)$$

де P – електрична потужність, що розсіюється на перетворювачі у вибраній робочій точці вольт-амперної характеристики; R_T , R_{Td} – відповідно статичний і динамічний опори терморезистора.

Для металевих ТРП з додатнім температурним коефіцієнтом опору (ТКО) значення динамічного опору R_{Td} завжди більше за значення статичного опору R_T , в результаті множник D є від'ємною величиною і визначається за виразом:

$$D = -\frac{\alpha \frac{P}{G_{th}}}{1 + \alpha \frac{P}{G_{th}}}, \quad (3)$$

де α – температурний коефіцієнт опору терморезистора.

Теплова стала часу τ_{th} характеризує інерційність ТРП у процесах встановлення теплової рівноваги між ним і довкіллям. Для об'ємних ТРП τ_{th} визначають за графіком зміни температури чутливого елемента у часі при ступінчастій зміні температури середовища [4]. На практиці зміна температури реалізується шляхом механічного переносу перетворювача із одного середовища в інше. Проте враховуючи числові значення цього параметру для ТРП, виготовлених за технологією МЕМС, на рівні одиниць – десятків мілісекунд, застосування традиційних методик його безпосереднього вимірювання є проблематичним. Електрична стала часу τ_{el} характеризує швидкість зміни струму та напруги в процесі їх

встановлення в електричному ланцюзі з ТРП; вона пов'язана з тепловою сталою τ_{th} та динамічним множником D співвідношенням [7]

$$\tau_{el} = \frac{\tau_{th}}{1+D}. \quad (4)$$

З останнього виразу та значень динамічного множника D випливає, що електрична стала часу металевих ТРП завжди менша за теплову. Беручи до уваги малий діапазон зміни динамічного множника (для ТРП в роботах авторів він лежить в діапазоні від 0 до мінус 0,4), сталі часу металевих ТРП є сумірними величинами. А оскільки значно простіше визначити електричну сталу часу перетворювача у вимірюваному середовищі, в цій роботі акценти у вимірюванні зосереджено саме на ній.

Однак тепла стала часу ТРП, виготовленого за технологією МЕМС, потребує окремого аналітичного дослідження.

2. Теплова стала часу місткового терморезисторного перетворювача

В роботі [6] показано, що наближення місткового перетворювача є досить точним для визначення статичних параметрів мембранного елемента. Тому для оцінки динамічних параметрів мембранного елемента скористаємося виразами залежності зміни температури місткового електропровідного перетворювача від часу після початку пропускання ступінчастого імпульсу розігрівачого струму з роботи [8]. До точного розв'язку, що описує перехідний процес, входить сума експонент, доданки якої швидко спадають з ростом порядкового номеру. Тому в першому наближенні проаналізуємо лише перший доданок:

$$\frac{1}{\tau_{th}} = \frac{1}{c\rho S_{br}L} \left(\frac{\pi^2 \lambda S_{br}}{L} + LHp - \frac{I^2 \alpha L}{\sigma S_{el}} \right), \quad (5)$$

де c , ρ , λ – усереднені питома теплоємність, густина і теплопровідність містка відповідно; S_{br} і S_{el} – відповідно площі поперечного перерізу містка і електропровідного прошарку; L – довжина містка; H – коефіцієнт теплообміну поверхні містка з навколишнім середовищем; p – периметр поперечного перерізу містка; I – електричний струм, який протікає через електропровідний прошарок; σ – питома провідність електропровідного прошарку. Перший доданок τ_{con} виразу (5) описує процеси встановлення температури містка з урахуванням теплопровідності по його довжині; другий доданок τ_{ch} відображає процеси теплообміну з навколишнім середови-

щем, третій доданок τ_{rev} враховує зворотний електротепловий зв'язок, що полягає в додатковій зміні опору перетворювача в процесі нагрівання вимірювальним струмом:

$$\begin{aligned} \tau_{con} &= c\rho S_{br}L \frac{L}{\pi^2 \lambda S_{br}} = \frac{C_{br}L}{\pi^2 \lambda S_{br}}; \\ \tau_{ch} &= c\rho S_{br}L \frac{1}{HpL} = \frac{C_{br}}{HpL}; \\ \tau_{rev} &= c\rho S_{br}L \frac{1}{\frac{I^2 \alpha L}{\sigma S_{el}}} = \frac{C_{br}}{\beta P_0}; \end{aligned} \quad (6)$$

де $C_{br} = c\rho S_{br}L$ – теплоємність містка; P_0 – потужність електричного струму, яка розсіюється на електропровідному прошарку.

Отримаємо числові значення параметрів швидкодії для нікелевого містка товщиною 0,1 мкм на підкладці $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ загальною товщиною 0,3 мкм, шириною 40 мкм і довжиною 1 мм. Питома теплоємність складових матеріалів: нікелю $c_{Ni} = 446 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, діелектрику $c_{\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4} = 446 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, густина $\rho_{Ni} = 446 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4} = 3440 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопровідність $\lambda_{Ni} = 72 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, ТКО $\alpha = 0,005 \text{ 1}/^\circ\text{C}$. Усереднені характеристики матеріалів розрахуємо за загальноприйнятою методикою із врахуванням геометрії містка [9]. Тоді $C_{br} = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/^\circ\text{C}$. В нерухомому повітрі за нормальних умов коефіцієнт теплообміну містка з навколишнім середовищем $H = 600 \text{ Вт}/\text{м}^2$. При розсіюванні на елементі ТРП потужності 10 мВт, результуюче числове значення теплової сталої часу становить:

$$\tau_{th} = \frac{C_{br}}{\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \lambda S_{br}}{L} + LHp - \frac{I^2 \alpha L}{\sigma S_{el}}} \approx 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ с} \quad (7)$$

Як випливає із формули (7), швидкодію містка в повітрі за нормальних умов визначають процеси теплообміну з навколишнім середовищем (доданок в знаменнику, що відповідає вкладу теплопровідності вздовж містка, на порядок менший за доданок, який характеризує теплообмін з оточуючим газом). До того ж для ТРП, виготовленого за технологією МЕМС, на швидкодію суттєво впливає тепловий зворотний зв'язок (третій від'ємний член в знаменнику виразу (7)). Теплова стала часу досліджуваних ТРП при струмі 10 мА, що забезпечує перегрів близько 100°C , становить 4,4 мс. У випадку ва-

кумування ТРП його коефіцієнт теплообміну наблизитиметься до нуля, теплообмін чутливого елемента визначатимуть процеси теплопровідності в елементах його конструкції, струм розігрівання потрібно зменшувати для запобігання надмірного перегріву.

3. Стенд для дослідження динамічних параметрів терморезисторного перетворювача, створений на базі програмно-апаратного комплексу NI Elvis II

Стенд для дослідження динамічних параметрів ТРП створено відповідно до основних вимог сучасної технології віртуальних інструментів (ТВІ) [5]. ТВІ передбачає поєднання спеціальних технічних засобів вимірювання та

керування, прикладного програмного забезпечення та стандартних промислових комп'ютерних технологій. ТВІ призначена для створення вимірювально-автоматизованих систем з гнучкою функціональністю, яка визначається програмним забезпеченням користувача.

Перевагою ТВІ при використанні її в наукових дослідженнях є саме функціональна гнучкість, програмна і апаратна відкритість, необхідні при модернізації автоматизованих стендів у випадку постановки нових дослідницьких завдань.

На рис. 1 зображено структурну схему розробленого стенду для дослідження динамічних параметрів ТРП фізичних величин, а на рис. 2 – його зовнішній вигляд.



Рис. 1. Структурна схема автоматизованого стенду для дослідження динамічних параметрів ТРП: 1 – досліджуваний ТРП, до складу якого входять активний нагрівач 2 і пасивні терморезистори 3 та 4; 5 – прецизійні резистори С2-29; 6 – макетна плата NI Protoboard; 7 – PCI-роз'єм для під'єднання плати до програмно-апаратного комплексу NI Elvis II; 8 – програмно-апаратний комплекс NI Elvis II; 9 – мережевий блок живлення комплексу; 10 – USB-інтерфейс; 11 – персональний комп'ютер

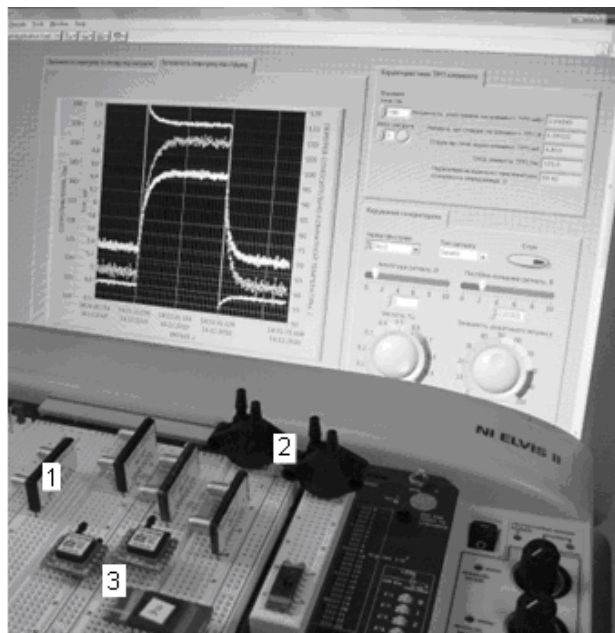


Рис. 2. Автоматизований стенд для дослідження динамічних параметрів ТРП: 1 – ТРП вітчизняного виробництва типу УР3201; 2, 3 – відповідно МЕМС-структури виробництва компаній Motorola (США) та Microbridge (Канада)

Принцип роботи стенду, розробленого на базі програмно-апаратного комплексу NI Elvis II, полягає в наступному. Активний елемент ТРП (нагрівач) ввімкнений послідовно з прецизійним резистором відомого номіналу типу С2-29 і живиться від вихідного аналогового порту функціонального генератора плати комутації апаратного комплексу. Пасивні елементи перетворювача послідовно з резисторами С2-29 підключені до вихідних аналогових портів керованого джерела живлення плати комутації. Резистори С2-29 та елементи ТРП під'єднанні до вхідних аналогових портів комутаційної плати для вимірювання падіння напруги на кожному з них і подальшого розрахунку струму живлення кожного з перетворювачів. Аналогові порти ввімкнено в диференційному режимі, що дозволяє програмно обирати діапазон зміни вхідного сигналу. Сигнали з вхідних аналогових портів через роз'єм PCI між програмно-апаратним комплексом та платою комутації надходять до 8-канального 16-розрядного АЦП програмно-апаратного комплексу NI Elvis II, обробляються апаратною частиною комплексу та через USB-інтерфейс надходять до персонального комп'ютера (ПК) з встановленим програмним забезпеченням LabVIEW 8.6.

В програмно-апаратному комплексі NI Elvis II для генерації сигналів використовується інтегральна мікросхема функціонально-го генератора XR2206 з можливостями амплітудної та частотної модуляції. «Груба» установка частоти виконується за допомогою конденсаторів частотної селекції, а точна – за допомогою вбудованого ЦАП. Функціональний генератор забезпечує генерацію сигналів синусоїдальної (діапазон частот 0,186 Гц ... 5 МГц), трикутної та прямокутної (0,186 Гц ... 1 МГц) форм по одному 10-бітному каналу амплітудою до 10 В (типова похибка 1 % від максимального значення напруги ± 15 мВ), постійною складовою ± 5 В; максимальний струм навантаження становить 100 мА. Оскільки точність задавання амплітуди імпульсів досить невисока, авторами вибрана архітектура вимірювального стенду, що передбачає поточний контроль струму живлення перетворювачів.

4. Опис програмного забезпечення

Для обробки інформації, яка надходить до ПК з аналогових входів програмно-апаратного комплексу NI Elvis II, авторами створено власний програмний код відповідно до сучасних вимог ТВІ на базі програмного забезпечення середовища LabView 8.6. Фрагмент програмного коду, алгоритм роботи якого подібний до описаного у роботі [1], наведено на рис. 3. Розрахунок поточного

значення температури елементів ТРП виконується підпрограмою згідно з рівнянням Каллендараван-Дьюзена. Температура в кожній робочій точці (I ; U) розраховується за попередньо визначеними опорами R_0 кожного з перетворювачів при 0°C , температурними коефіцієнтами опору α , виміряними поточними значеннями падіння напруги U на перетворювачі та струму I через нього [6, 9]:

$$T(R_T) = \frac{U - R_0}{\alpha R_0} \quad (8)$$

де U – виміряне значення падіння напруги на елементі; I – виміряне значення струму, який протікає через елемент; R_0 – опір елемента при температурі 0°C .

Підпрограма DAQ Assistant забезпечує зчитування вхідних сигналів по кожному каналу з частотою («Sampling rate») 10 кГц, при цьому кількість вимірювань за одне зчитування («Samples to read») становить 1000 значень. Для відображення поточного значення температури використовується програмна апроксимація поліномом п'ятого порядку. В результаті похибка визначення температури елементів не перевищує $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Керування роботою функціонального генератора здійснюється за допомогою підпрограми з бібліотеки стандартних зразків програмного коду NI LabVIEW 8.6 «NI ElvisMX Function Generator».

Лицьову панель віртуального приладу з елементами керування генератором, контролем поточних параметрів і графічним відображенням характеристик ТРП в правій частині екрану показано на рис. 4.

5. Результати дослідження динамічних параметрів ТРП

За допомогою розробленого стенду отримано графіки часових залежностей напруги, опору та температури активного елемента ТРП типу УР3201 вітчизняного виробництва при живленні з виходу функціонального генератора. На активний елемент подані імпульсні сигнали прямокутної форми з програмно регульованою частотою, скважністю, постійною складовою і амплітудою змінної складової. Змінну складову сигналу живлення подільника амплітудою 0,65 В, частотою 10 Гц і коефіцієнтом заповнення 0,5 накладено на постійну складову 1,7 В. Приклад графіків часових залежностей вказаних фізичних величин для перетворювача, що працює в повітрі за нормальних умов, наведено на рис. 5.

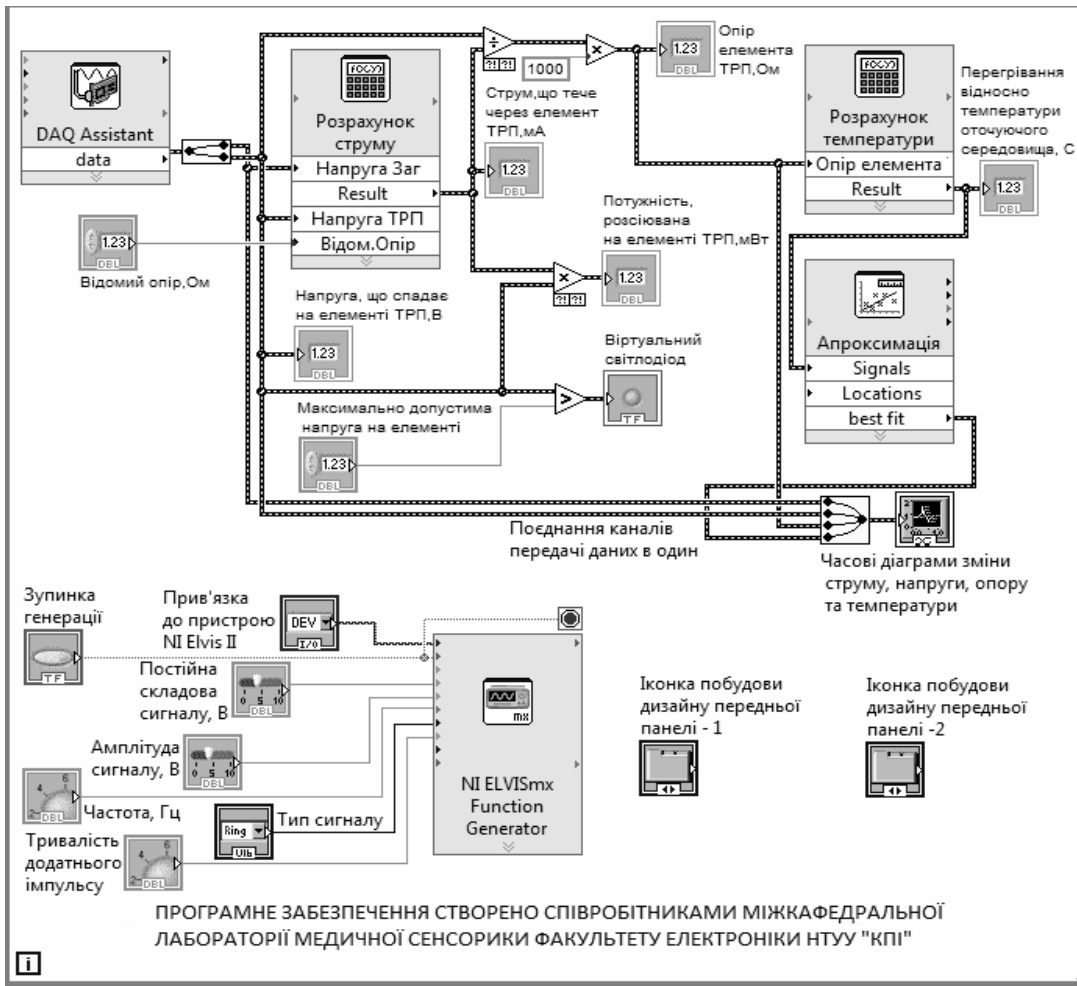


Рис. 3. Фрагмент програмного коду автоматизованого стенду для вимірювання динамічних параметрів ТРП

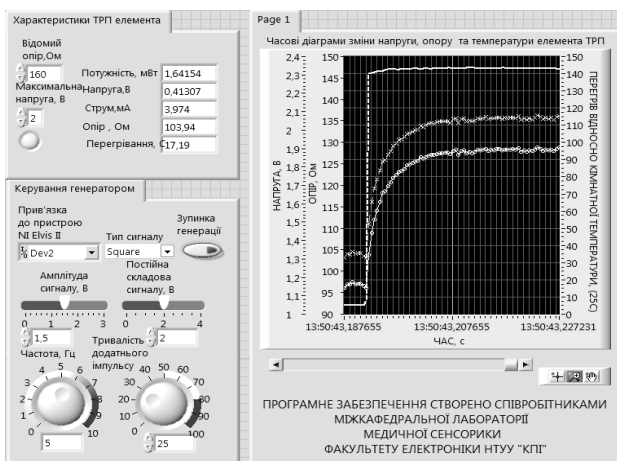


Рис. 4. Лицьова панель віртуального стенду для вимірювання динамічних параметрів ТРП, виготовлених за технологією MEMS

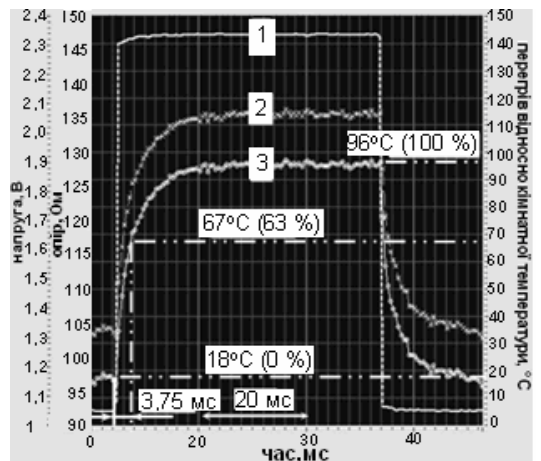


Рис. 5. Залежності напруги на подільнику (крива 1), опору (крива 2) та температури (крива 3) активного елемента від часу при поданні імпульсного сигналу на подільник

Виміряне значення електричної сталої часу активного елемента становить 3,75 мс.

Динамічний коефіцієнт розсіяння потужності відповідно до виразу (4) визначатиметься як відношення зміни електричної потужності до зміни температури елемента. У роботах [6, 10] авторами показано, що для центрального елемента ТРП зміна потужності у 10 мВт викликає зміну температури у 100 °С, тобто $G_{thD} = 0,1 \text{ мВт/}^\circ\text{С}$. Для досліджуваного зразка ТКО активного елемента $\alpha \approx 0,005 \text{ 1/}^\circ\text{С}$, що дає змогу визначити динамічний множник у відповідності до формули (3): $D = -0,332$. Підставивши отримане значення у вираз (2), розрахували величину теплової сталої часу: $\tau_{th} = 5 \text{ мс}$. Отже, розраховані за експериментальними даними і теоретичною формулою (7) значення теплової сталої часу ТРП є досить близькими. Нарешті, з формули (1) підраховали теплоємність активного елемента досліджуваної МЕМС структури, що працює в повітрі за нормальних умов: $C_{br} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{С)}$.

Також в роботі отримані часові залежності напруги на подільнику, опору та температури нагрівача при вміщенні ТРП у дистильовану во-

ду (рис. 6, а) та у етиловий 96 %-й спирт (рис. 6, б). Постійна складова напруги на подільнику для проведених вимірів становила 2,56 В, амплітуда змінної складової – 1,3 В, частота 0,5 – Гц, коефіцієнт заповнення – 0,5.

З наведених характеристик випливає, що за однакової зміни потужності, яка розсіюється на центральному нагрівачі, відносні зміни опору і, відповідно, температури цього нагрівача в спирті та у воді були істотно різними. Наприклад, при зміні потужності від 2,5 до 22,5 мВт відносно збільшення опору активного елемента у спирті становить 32,6 %, що відповідає зростанню температури на 68 °С (рис. 6, а) і сталій розсіяння 0,29 мВт/°С. При тій самій зміні потужності відносно збільшення опору нагрівача у дистильованій воді склало 10,2 %, що відповідає зростанню температури на 22 °С і сталій розсіяння 0,91 мВт/°С. Отримані дані свідчать про можливість використання досліджуваних ТРП як датчики відсоткового вмісту спирту в водних розчинах. Зазначимо, що значення теплової сталої часу ТРП в досліджуваних речовинах також суттєво різні: 60 мс у спирті та 40 мс у воді. Отримані результати будуть доповнені в подальших дослідженнях авторського колективу.

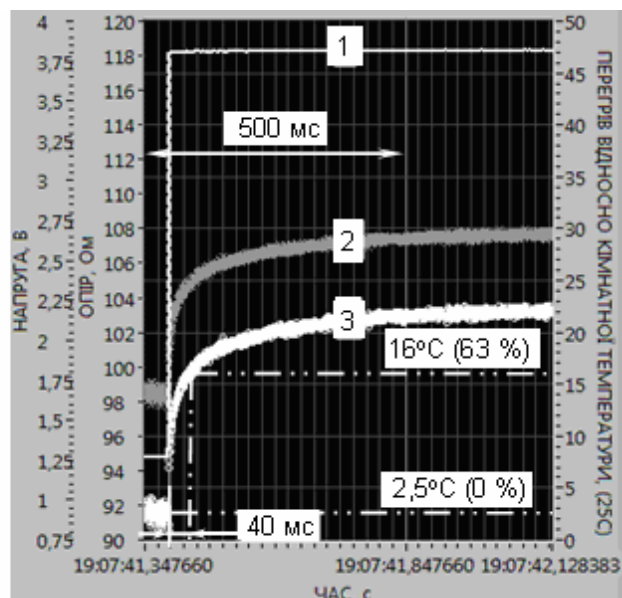
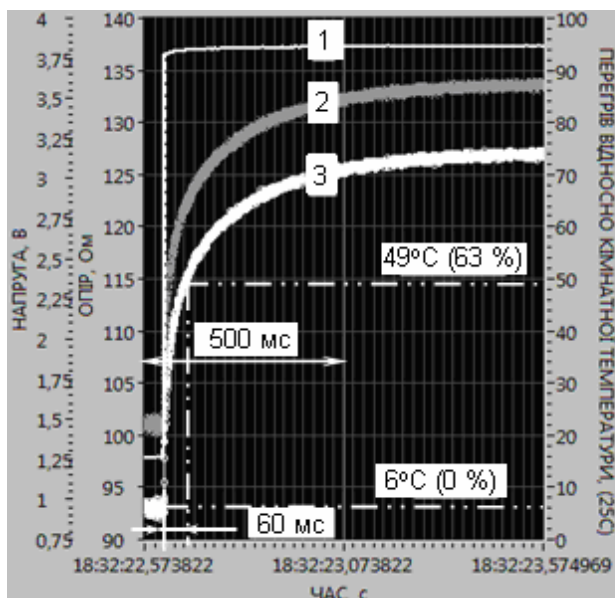


Рис. 6. Часові залежності напруги на подільнику 1, опору 2 та температури 3 нагрівача ТРП, який поміщений: а – в етиловий 96 %-й спирт; б – у дистильовану воду

Висновки

1. Виміряні в роботі числові значення динамічних параметрів мікромеханічних терморезисторних перетворювачів вітчизняного виробництва відповідають теоретично розрахованим в рамках моделі перетворювача місткової геометрії. Величина теплової сталої часу становить 5 мс,

а теплоємність активного елемента досліджуваного ТРП в повітрі за нормальних умов складає $5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/}^\circ\text{С}$.

2. Розроблений в роботі автоматизований апаратно-програмний стенд для вимірювання динамічних параметрів ТРП відповідає сучасним вимогам до віртуальних інструментів. Завдяки функціональній гнучкості, програмній і

апаратній відкритості він легко адаптується до вимог конкретного користувача в наукових дослідженнях.

3. Експериментально показана можливість використання досліджуваних ТРП структур для вимірювання концентрації спирту в водних розчинах.

Література

1. *Damean N.* Measurement concepts: from a classical transducers to new MEMS // Measurement. – 2000. – № 22. – P.159–178.
2. *Пат. 18749 України.* Спосіб визначення густини газів: Пат. 18749 України В.Ф. Заворотний, О.В. Борисов, Б.І. Луцина, С.М. Осінов (Україна) – №18749; Заявл. 09.10.05; Опубл. 20.03.06 р. – 5 с.
3. *Thermal Conductivity Gauge TCG-3880 from Xensor Integration, Data Sheet.* – <http://www.xensor.nl>.
4. *Перетворювачі опору.* Загальні технічні вимоги та методи випробувань: ДСТУ 2858 – 1994. – [Чинний від 1994 – 11 – 23]. – К., 1994. – 106 с. – (Національний стандарт України).
5. *Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI Elvis: Руководство пользователя.* – <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=1778523>.
6. *Борисов О.В., Дейнека І.С., Луцина Б.І.* Автоматизований стенд на основі плати збору даних NI USB-6009 для вимірювання статичних параметрів мікромеханічного терморезисторного перетворювача // Електроніка і зв'язь. – 2010. – № 5. – С. 113–119.
7. *Шашков А.Г.* Терморезисторы и их применение. – М.: Энергия, 1967. – 320 с.
8. *Попов В.С.* Подогреваемые электрические сопротивления в электроизмерительной технике и автоматике. – М.: Наука, 1964. – 228 с.
9. *Chen Y.M., Shie J.S., Hwang T.* Parameter extraction of resistive thermal sensors // Sensors and Actuators. – 1996. – № 55. – P. 43–47.
10. *Луцина Б.І., Борисов О.В., Заворотний В.Ф., Кацан І.І., Осінов С.М.* Моделювання та оптимізація конструкції мікромеханічного терморезисторного перетворювача // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Материалы 2-го Международного радиоэлектронного форума (19–23 сентября 2005 г.). – Харьков, 2005. С. 240–243.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Поступила в редакцію 05 ноября 2010 г.