

СХЕМА ТА SPICE МОДЕЛЬ СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ БІОМЕДИЧНОГО ДИФЕРЕНЦІЙНОГО СКАНУЮЧОГО КАЛОРИМЕТРА

Розглянуті основні підходи та результати схемного SPICE моделювання сенсора різницевої температури диференціального скануючого калориметра. Первинний перетворювач базується на біполярних транзисторних структурах, що формують схему диференціального каскаду. Диференційний каскад сенсора температури реалізовано на n-p-n транзисторах у мікрокорпусному конструктиві SOT23 з розмірами приблизно $1 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$. Роздільна здатність вимірювання різниці температур становить $0,001^\circ\text{C}$. Перевагами сенсора є його мініатюрність, висока чутливість і лінійність функції перетворення.

Ключові слова: сенсор температури, диференціальна скануюча калориметрія, біомедична електроніка, SPICE модель.

Рассмотрены основные подходы и результаты схемного SPICE моделирования сенсора разностной температуры дифференциального сканирующего калориметра. Первичный преобразователь базируется на биполярных транзисторных структурах, которые формируют схему дифференциального каскада. Дифференциальный каскад сенсора температуры реализовано на n-p-n транзисторах в микрокорпусах SOT23 с размерами приблизительно $1 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$. Разрешающая способность измерения разности температур составляет $0,001^\circ\text{C}$. Преимуществами сенсора является его миниатюрность, высокая чувствительность и линейность функции преобразования.

Ключевые слова: сенсор температуры, дифференциальная сканирующая калориметрия, биомедицинская электроника, SPICE модель.

Main approaches to SPICE modeling of a differential scanning calorimeter temperature sensor are considered. The primary transducer is based on bipolar transistor structures configured in differential stage circuit. The differential stage circuit of temperature sensor is composed on n-p-n transistors in SOT23 microcases with dimensions about $1 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$. Resolution of differential temperature measurement is 0.001°C . Advantages of the sensor are diminutiveness, high sensitivity and linearity of transduction function.

Keywords: temperature sensor, differential scanning calorimeter, biomedical electronics, SPICE model.

Вступ та мета

Значна кількість сучасних сенсорів температури в діапазоні вимірювання від -50°C до $+120^\circ\text{C}$ в якості первинних перетворювачів використовують напівпровідникові біполярні та польові транзисторні структури [1]. Інформативною величиною температури таких сенсорів служать температурні залежності напруги на p-n переходах транзисторної структури, порогової напруги, вихідних та вхідних струмів, коефіцієнтів підсилення, коефіцієнтів перерозподілу струмів в транзисторних каскадах тощо [2-5].

В даній роботі розглянуті питання побудови, моделювання та дослідження біомедичного сенсора різницевої температури на біполярних транзисторних структурах [6]. Такі сенсори різницевої температури широко використовуються, зокрема, в термоанемометрах – засобах вимірювання параметрів потоку рідин чи газів [7,8], та диференціальних скануючих калориметрах – засобах хімічного, біохімічного та структурного аналізу досліджуваних речовин [9] (полімерів, білків тощо).

Так, диференціальна скануюча калориметрія (ДСК) базується на вимірюванні кілько-

сті енергії, поглиненої зразком або, що виділилася зі зразка, при неперервному підвищенні чи зниженні температури. Серед сучасних пристроїв, що забезпечують автоматизацію ДСК є, зокрема, диференційний скануючий калориметр *Diamond DSC* компанії *PerkinElmer* [10].

За останній час ДСК знайшла своє використання в інформаційно-вимірювальних системах біомедичного призначення. З їх допомогою проводять якісний та кількісний аналіз фармацевтичних засобів, білків, кісткової тканини, м'язів тощо [11,12]. Нажаль, існуючі пристрої ДСК не в повній мірі забезпечують вимоги біомедичної сенсорики. Особливістю останньої є необхідність зменшення мінімально допустимої маси досліджуваної речовини (до декількох грам і менше), підвищення точності вимірювання, а також, відповідність вимогам сучасної біомедичної мікроелектроніки.

В рамках даної роботи поставлена задача модельного дослідження сенсора температури ДСК на транзисторних структурах.

Сучасні транзистори характеризуються гранично малими розмірами (від міліметрів і до мікромметрів), а сигнальні перетворювачі термометрів на їх основі, забезпечують суттєво вищу, у порівнянні з терморезисторами чи термопарами, температурну чутливість. Крім того, використання транзисторів відкриває можливість інтегрування двох функцій калориметра в одній структурі – вимірювання температури та її контрольованого нагріву. Мова йде про пристрої з саморозігрівом – транзисторна структура може використовуватися, як джерелом тепла внаслідок її саморозігріву струмом живлення, так і сенсором температури.

1. Структурна реалізація сенсора температури ДСК

Транзистори сенсора температури ДСК вмикають по схемі диференціального каскаду [13]. Така схема дозволяє сформувати набір сигналів, що є інформативними параметрами, як диференціальної (різницевої), так і абсолютної температури. Саме за цими температурами проводять ДСК аналіз

досліджуваних біопроб.

Диференційний каскад на двох біполярних транзисторах з об'єднаними емітерами описується рівняннями [2]

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1}; I_{C2} = \alpha_2 I_{E2}; I_{E1} + I_{E2} = I_{\Sigma E},$$

де I_{C1}, I_{E1} – колекторний та емітерний струми транзистора T_1 ; I_{C2}, I_{E2} – аналогічно для транзистора T_2 ; α_1, α_2 – коефіцієнти передачі струму цих транзисторів (типово $\alpha = 0,99..0,995$);

$$I_{E1} = I_{SE10} \exp\left(\frac{V_{BE1}}{m_1 \phi_T} - 1\right); I_{E2} = I_{SE20} \exp\left(\frac{V_{BE2}}{m_2 \phi_T} - 1\right) -$$

залежності емітерних струмів транзисторів від напруги V_{BE1}, V_{BE2} їх емітерно-базових $p-n$ переходів; $I_{SE10}, I_{SE20}, m_1, m_2$ – відповідно, струми насичення та коефіцієнти неідеальності цих $p-n$ переходів; $\phi_T = kT/q$ – температурний потенціал; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура; q – заряд електрона; $I_{\Sigma E}$ – сумарний струм, що втікає в емітерні $p-n$ переходи транзисторів і задається стабілізуючим резистором емітерних кіл транзисторів.

Первинний вимірювальний перетворювач температури (зонди) ДСК реалізовано на $n-p-n$ транзисторах у мікрокорпусному конструктиві SOT23 з розмірами приблизно $1 \times 2 \times 3$ мм³. Крім зондів (рис. 1а) в склад сенсора ДСК входить сигнальний підсилювач (рис. 1б) на основі 24-розрядного аналогоцифрового перетворювача з вбудованим мікроконтролером типу *ADuC834*, *USB* інтерфейс та персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Роздільна здатність вимірювання різниці температур становить $0,001^\circ\text{C}$.

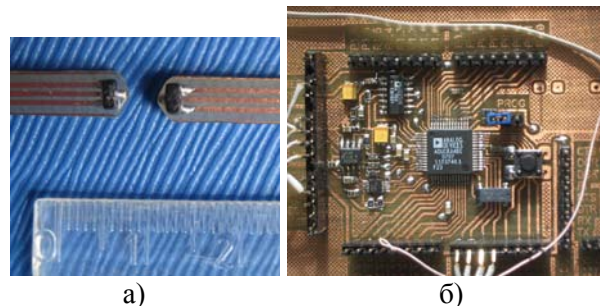


Рис. 1. Зонди (а) та сигнальний перетворювач сенсора різницевої температури (б).

2. Схема та вольт-амперна характеристика сенсора

Схема та приклад модельного дослідження вольт-амперної характеристики (ВАХ) диференціального каскаду, а саме, залежності колекторних струмів I_{C1} , I_{C2} транзисторів від різниці напруг $dV_{in}=V_{BE1}-V_{BE2}$ наведено на рис.2. Тут і надалі в наведених у статті даних, модельні дослідження проводилися з використанням *SPICE* моделей біполярних транзисторів в пакеті програм схемного моделювання *Micro-Cap Spectrum Software*. Цей пакет є одним з найбільш розповсюджених, підтримує *SPICE* синтаксис, має широку бібліотеку компонентів та зручний графічний інтерфейс [14]. У відповідності до *SPICE* синтаксису колекторні струми транзисторів $Q1$, $Q2$ показані умовними позначеннями " $IC(Q1)$ " та " $IC(Q2)$ ", позначення " m " по осі Ox означає мілівольти, а " μ " по осі Oy – мікроампери.

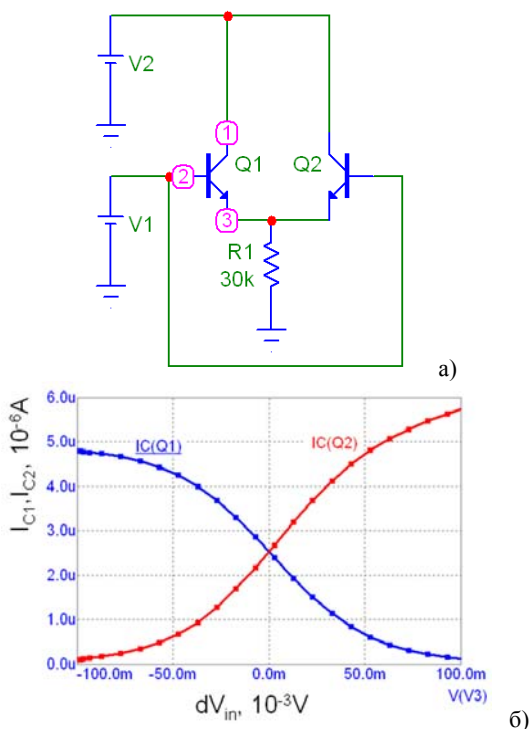


Рис. 2. Схема (а) та ВАХ диференціального каскаду (б).

Інформативним сигналом диференціальної температури є різниця колекторних струмів $\Delta IC(T)=IC2(T)-IC1(T)$ транзисторів, що обумовлена відповідною різницею температур транзисторних структур диферен-

ціального каскаду. Натомість, інформативним сигналом абсолютної температури є сумарний колекторний струм транзисторів. Температурно залежними параметрами транзисторів, що визначають інформативні сигнали є $I_{SE0}(T)$, $\phi_T(T)$, $\alpha(T)$.

3. Процес та результати модельних досліджень

Основою подальших модельних досліджень є визначення температурних залежностей вихідних сигналів диференціального каскаду. Ця задача вирішується з використанням параметру відносної температури елементів, що і визначає можливість моделювання пристрою вимірювання різницевої температури. У *SPICE* моделі, як це показано у вікні специфікації моделі біполярного транзистора (рис. 3), відносна температура елементу описується величиною T_REL_GLOBAL .

В процесі модельних досліджень відносну температуру T_REL_GLOBAL здебільшого використовують в якості аргументу функціональної залежності (*Variable 1*). На рис.3а наведено фрагмент вікна специфікації моделі біполярного транзистора (контуром обведено параметр T_REL_GLOBAL - відносної температури транзистора *BC337T*). В такому типі досліджень задається діапазон зміни температури T_REL_GLOBAL та крок виводу числових даних - *Range:6,-6,1*. У відповідності до синтаксису *MicroCAP* першою величиною є максимальне значення T_REL_GLOBAL (в даному випадку 6°C), другою величиною - мінімальне значення (-6°C), а третьою величиною – крок виводу числових значень (1°C). Відзначимо, що числове значення кроку зміни температури T_REL_GLOBAL при використанні її в якості аргументу на точність розрахунку не впливає – фактично розрахунок проводиться з кроком у соті долі градуса (крок визначається точністю, що встановлюється в наборі параметрів *Global Settings*).

Особливістю більшості проведених нами досліджень, результати яких приведені далі, є використання температури не лише в якості аргументу функціональних залежно-

стей, але і в якості величини, покровова зміна якої визначає сімейство температурних характеристик. Зокрема, аргументом може бути відносна температура транзистора диференціального каскаду, що визначає різницеву температуру dt , а величиною, яка визначає сімейство температурних характеристик – абсолютна температура. Такі дослідження дозволяють визначити чутливість сенсора до різничевої температури при зміні абсолютної температури.

Представляється можливим два методи отримання сімейства температурних характеристик. В першому методі використовують другу змінну *Variable 2*, вказуючи *Name: Temp* та дискретні значення абсолютної температури, зокрема $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (в синтаксисі *MicroCAP* абсолютна температура t визначається не за шкалою Кельвіна, як це прийнято у фізиці, а за шкалою Цельсія). Другий метод передбачає використання методу *Stepping*, при якому встановлюється тип параметру *Parameter Type: Model*. Вікно *DC Analysis Limits* з специфікованими двома змінними: *Variable 1 (Auto) NPN BC337T* та *Variable 2 (List) T_REL_GLOBAL* наведено на рис. 3б.

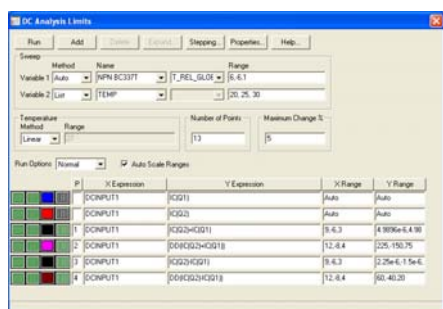
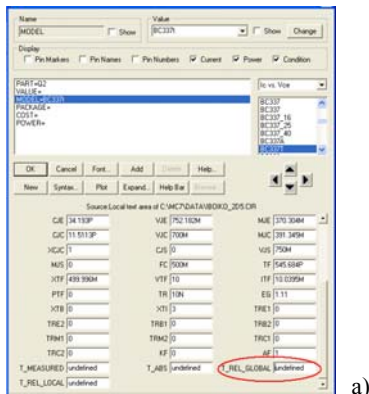


Рис. 3. Вікна специфікації модельних досліджень.

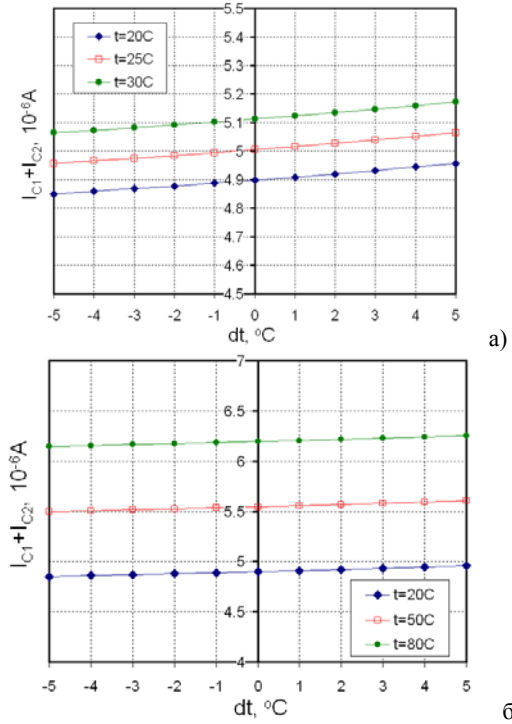


Рис. 4. Залежність суми колекторних струмів IC_1+IC_2 диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від різниці температур dt при $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (а) та $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (б).

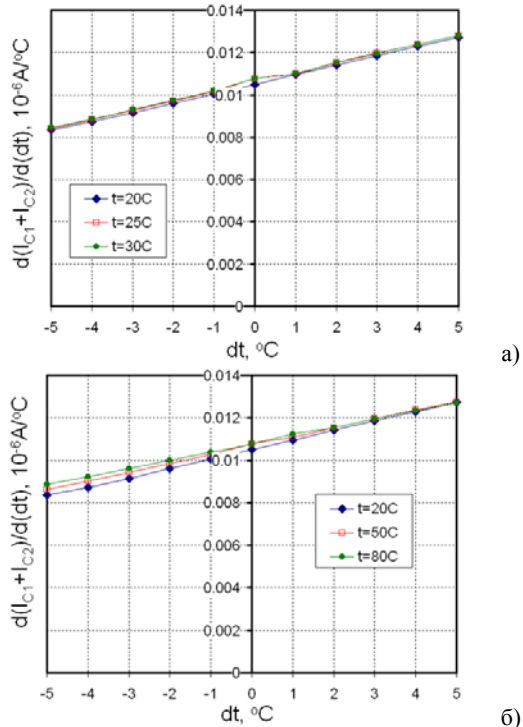


Рис. 5. Залежність крутизни функції суми колекторних струмів $(IC_1+IC_2)/dt$ диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від різниці температур dt при $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (а) та $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (б).

Далі наведені характерні результати модельних досліджень, що проводилися з використанням вищенаведених методів. Зокрема, на рис. 4 наведені залежності сумарного струму $I_{\Sigma} = I_{C1} + I_{C2}$ колекторів транзисторів диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від різниці температур dt при дискретних значеннях абсолютної температури $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (рис.4а) та $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (рис.4б). Ці залежності дозволяють встановити типові закономірності – приріст сумарного значення струму I_{Σ} абсолютної температури на $t=1^{\circ}\text{C}$ приблизно становить $0,02\text{ мкА}$, а при зміні різницевої температури $dt=1^{\circ}\text{C}$ – $0,01\text{ мкА}$ (при напрузі початкового зміщення базових кіл транзисторів $V1=1\text{В}$, напрузі живлення $V2=3\text{В}$ та опорі резистора емітерного кола $R1 = 100\text{ к}\Omega$).

Для більш точного кількісного аналізу отриманих закономірностей на рис. 5 наведені їх похідні $d(I_{C1} + I_{C2})/d(dt)$. Можна бачити, що при зміні абсолютної температури $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (рис. 5а) крутизна функції сумарного струму I_{Σ} залишається практично стабільною, а при $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (рис. 5б) – її зміна залишається незначною.

Результати залежності різницевого значення струму $I_D = I_{C1} - I_{C2}$ при тих же вхідних даних наведені на рис. 6. В першому наближенні можна вважати, що абсолютна температура t практично не впливає на різницеве значення струму I_D , і таким чином, це значення може використовуватися в якості інформативної величини різницевої температури.

Однак, більш детальний аналіз, що реалізується шляхом диференціювання різницевого значення струму $d(I_{C1} - I_{C2})/d(dt)$, показує певну нелінійність функції різницевого струму та її нестабільність при зміні абсолютної температури (рис. 7). В діапазоні різницевої температури $dt = 5^{\circ}\text{C}$ нелінійність функції орієнтовно становить $0,01\text{ мкА}$ (усереднено – $0,002\text{ мкА}$ на 1°C), а при зміні абсолютної температури на 30°C (зокрема, при зростанні з 20°C до 50°C) нестабільність

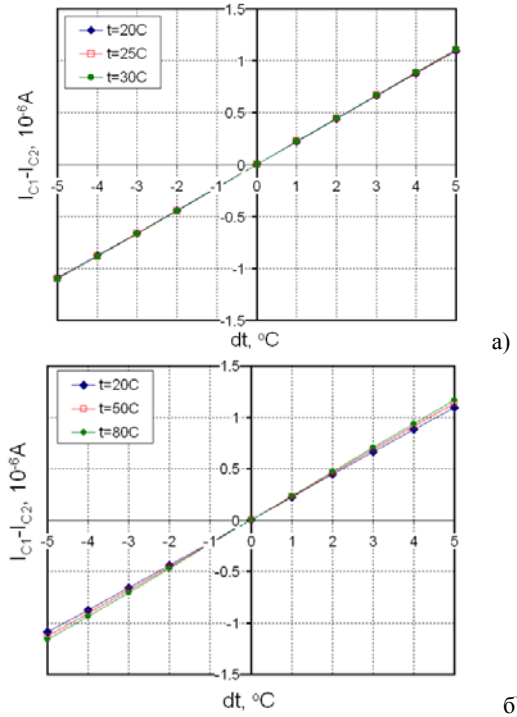


Рис. 6. Залежність різниці колекторних струмів $I_{C1} - I_{C2}$ диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від різниці температур dt при $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (а) та $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (б).

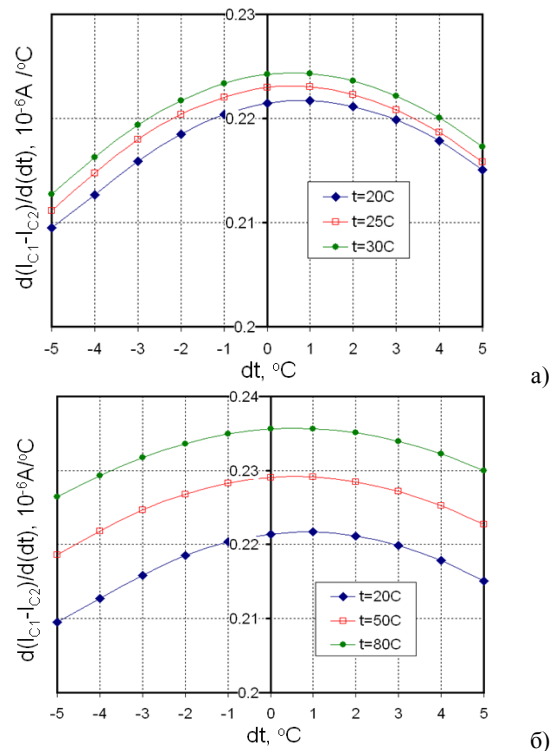


Рис. 7. Залежність крутизни функції різниці колекторних струмів $(I_{C1} - I_{C2})/dt$ диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від різниці температур dt при $t=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C (а) та $t=20^{\circ}\text{C}$, 50°C , 80°C (б).

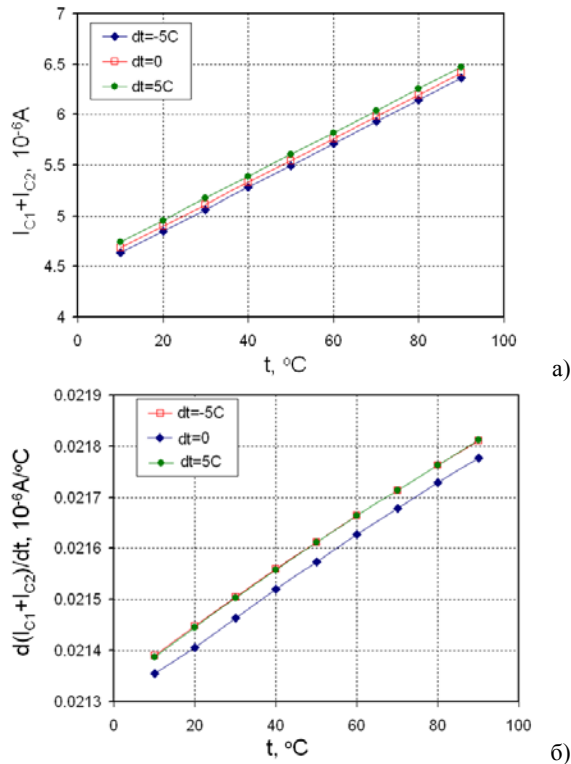


Рис. 8. Залежність суми колекторних струмів $I_{C1}+I_{C2}$ (а) та крутизни $d(I_{C1}+I_{C2})/dt$ (б) диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від температури.

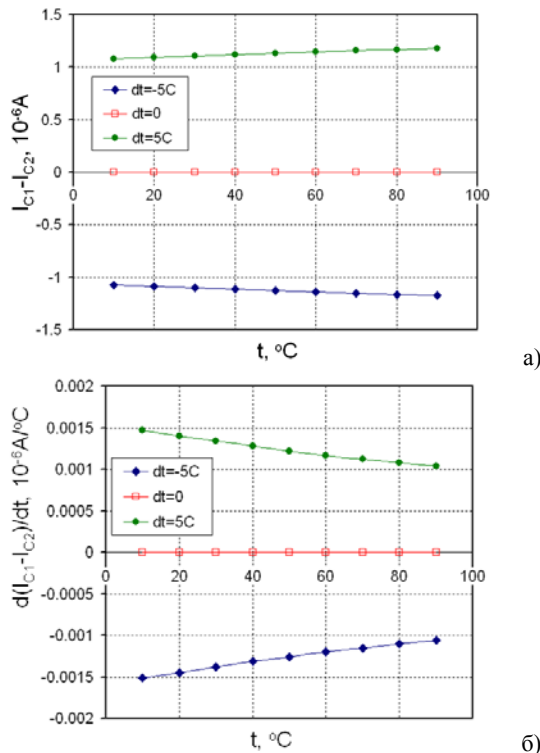


Рис. 9. Залежність різниці колекторних струмів $I_{C1}-I_{C2}$ (а) та крутизни $d(I_{C1}-I_{C2})/dt$ (б) диференціального каскаду з резистивним емітерним колом від температури.

чутливості до різницевої температури ориєнтовно становить 0,009 мкА (усереднено – 0,0003 мкА на 1°C). І хоч значення виявленої в ході проведених нами досліджень нестабільності функції перетворення є незначною, все ж у високопрецизійних термометрах різницевої температури ця нестабільність зумовлює доволі значні похибки вимірювання.

Зокрема, якщо сенсор різницевої температури був відкаліброваним при абсолютній температурі 0°C , то похибка вимірювання різницевої температури при зростанні абсолютної температури до 100°C буде визначатися похибкою крутизни функції перетворення $0,0003 \text{ мкА} \times 100^{\circ}\text{C} = 0,03 \text{ мкА}$ на 1°C . В першому наближенні це відповідає похибці вимірювання різницевої температури $0,03/0,22 \approx 0,13^{\circ}\text{C}$.

Ряд інших результатів модельних досліджень, при яких аргументом функцій є абсолютна температура, а сімейства температурних залежностей розраховуються для ряду фіксованих значень різницевої температури dt , наведені на рис. 8 та рис. 9. Такі дослідження дозволяють більш точно встановити числові коефіцієнти залежностей сумарного та різницевого струмів від абсолютної температури.

Зокрема, можна бачити, що похідна функції $d(I_{C1}+I_{C2})/dt$ зростає з $0,0214 \text{ мкА}/^{\circ}\text{C}$ при 10°C до $0,0218 \text{ мкА}/^{\circ}\text{C}$ при 90°C (рис. 8б), тобто зростає приблизно на 2%. Натомість при такій же зміні абсолютної температури та різниці температур $dt=5^{\circ}\text{C}$ похідна функції $d(I_{C1}-I_{C2})/dt$ спадає з $0,0015 \text{ мкА}/^{\circ}\text{C}$ до $0,001 \text{ мкА}/^{\circ}\text{C}$ (рис. 9б), тобто спадає приблизно на 30 %.

Висновки

Розглянуті основні підходи та результати SPICE модельних досліджень сигналів сенсора температури біомедичного калориметра на транзисторних структурах. Транзистори сенсора температури ДСК вмикають по схемі диференціального каскаду. Така схема дозволяє сформувати набір сигналів, що є інформативними параметрами, як ди-

ференціальної (різницевої), так і абсолютної температури. Інформативним сигналом диференціальної температури є різниця колекторних струмів транзисторів, що обумовлена відповідною різницею температур транзисторних структур диференціального каскаду. Інформативним сигналом абсолютної температури є сумарний колекторний струм транзисторів.

Первинний вимірювальний перетворювач температури ДСК реалізовано на *n-p-n* транзисторах у мікрокорпусному конструктиві SOT23 з розмірами приблизно $1 \times 2 \times 3$ мм³. Крім зондів в склад сенсора ДСК входить сигнальний підсилювач на основі 24-розрядного аналого-цифрового перетворювача з вбудованим мікроконтролером типу ADuC834, USB інтерфейс та персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Роздільна здатність вимірювання різниці температур становить 0,001°C.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Pertjjs, M.A.P.; Niederkorn, A.* A CMOS smart temperature sensor with a 3σ inaccuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ from -50°C to 120°C // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2005. – **40** (2). – P. 454-461.
2. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / За ред. Готри З., Голяки Р. – Львів: Вид. Державного університету "Львівська політехніка", 1999. – 364с.
3. *Gotra Z.Yu., Holyaka R.L., Gladoun M.R. et al.* Controlled voltage source with relative temperature scale // *International Journal of Microcircuits & Electronic Packaging*. – 1997. – **20**(3) – P.447-452.
4. *Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Халавка А.И.* Монолитные полупроводниковые интегрированные цепи на эффектах теплопередачи // *Известия ВУЗов "Радиоэлектроника"*. – 1999. **42**(1-2). – С.59-65.
5. *Gotra Z.Yu., Holyaka R.L., Khalavka A.I. et al.* Application of the heat-transfer process to monolithic low-frequency IC design // *Journal of Electrical Engineering*. – 1997. – **48**(11-12). – P.307-311.
6. *Husak M., Jakovenko J., Boura A.* Sensor system with differential arrangement of temperature MOS sensor // *IEEE International Conference ICIT 2005*. - 2005. – P. 438-442.
7. *Sosna C., Buchner R., Lang W.* A Temperature Compensation Circuit for Thermal Flow Sensors Operated in Constant-Temperature-Difference Mode // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2010. – **59**(6). – P. 1715-1721.
8. *Готра З.Ю., Павлов С.В., Голяка Р.Л. та ін.* Мік-
9. *Behme R., Brooke D.* Heat of Fusion measurement of a low melting polymorph of carbamazepine that undergoes multiple phase changes during DSC analysis // *J. Pharm Sci.* – 2006. - **80**(10). – P. 986-990.
10. *Cassel B., Packer R.* Modulated Temperature DSC and the DSC 8500: A Step Up in Performance // *PerkinElmer, Inc.* <http://las.perkinelmer.com/>.
11. Левицкий Д.И. Применение метода дифференциальной сканирующей калориметрии для структурно-функциональных исследований мышечных белков // *Успехи биологической химии*. – 2004. - **44**. - С.133-170.
12. *Жнякина Л.Е., Мощенский Ю.В., Ткаченко М.Л. и др.* Система дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования лекарственных объектов // *Химико-фармацевтический журнал* - 2005. - **11**. - С.46-49.
13. *Готра З.Ю., Голяка Р.Л., Павлов С.В., Куленко С.С., Манус О.В.* Дифференциальный термометр с высокой разрешающей способностью // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. Одесса. – 2009. – №6 – С.19-23.
14. *Micro-Cap 7.0, 8.0, 9.0 Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual.* Spectrum Software. 2001, 2005, 2008. www.spectrum-soft.com.