

1.8. USE OF MODERN SEMICONDUCTOR SENSORS FOR THE DESIGN OF TEMPERATURE CONTROLLERS

В сучасних системах збору, зберігання та обробки інформації в АСУТП швидкість прийому-передачі росте по експоненційному закону і разом з цим пред'являють вимоги щодо достовірності вимірюваної величини і багатопотоку різних вимірюваних параметрів. Використовувані раніше датчики хімічної термоперетворення через складні нелінійні характеристики і залежності ряду факторів вже не можуть забезпечити швидку передачу інформації від вимірюваного об'єкту в систему обробки. На сучасному етапі проектування необхідно вивчати поведінку складних гібридних напівпровідникових структур в якості термоперетворювачів. Однак, для узгодження з мікропроцесорними системами цих структур раніше було необхідно підключення складних і дорогих аналого-цифрових перетворювачів, а це ускладнювало проектування та налагодження всього термодатчика в цілому.

Сучасні мікроконтролери таких фірм як ALTERA, XILINX, Texas Instruments вже мають вбудований блок ADC/DAC, до яких можна безпосередньо підключати різні термоперетворювачі. Але для того, щоб забезпечити повне узгодження (струмову, гальванічну розв'язку) необхідно детально досліджувати різні схеми на напівпровідникових термоелементах. Для цього необхідно вивчити фізичні процеси в напівпровідникових перетворювачах.

Також важливою проблемою залишається підключення силового навантаження в кінцевих каскадах мікроконтролерних пристроях та погодження їх в багатопотоковому режимі.

Метою цієї роботи є вивчення критеріїв вибору напівпровідникового датчика, дослідження його характеристик і проектування принципової схеми температурного контролера для повної реалізації поставленого завдання. Також був розроблений простий алгоритм і код на мові C++ для налаштування портів, обробки даних і виведення інформації на восьмибітні індикатори з урахуванням архітектури мікроконтролерів серії PIC.

При проектуванні систем довготривалого температурного моніторингу велике значення має стабільність показань, що використовуються для цих цілей температурних датчиків. Висока стабільність свідчень дозволяє підвищити міжперевірний інтервал, підвищити надійність вимірювань та скоротити експлуатаційні витрати. Якщо точність контролю температури, яка вимагається, невисока, то дані вимоги легко виконуються для більшості сучасних сенсорів.

Після порівняльного аналізу вибір був зроблений на користь датчиків серії DS1820 фірми за значенням порогу температурної чутливості, що досягає величини $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $-55\dots+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому в силу малих розмірів їх постійна величина часу не перевищує $10\dots30\text{ с}$, що вельми важливо при вирішенні завдання виявлення виникнення позаштатних ситуацій.

До того ж, значення постійної величини часу можна досить просто алгоритмічно зменшити як мінімум у 4 рази. Абсолютна похибка вимірювання, складова у даних датчиків $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у всьому діапазоні вимірювань, також виявилася цілком достатньою для вирішення поставлених завдань. Вбудовані підсилювачі можуть призводити коефіцієнт перетворення датчика до значень близько $10\text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$. Ці пристрої широко використовуються в вузлах компенсації холодного спаювання для термопар, що працюють в широкому температурному діапазоні. В основі роботи всіх напівпровідникових температурних датчиків лежить співвідношення між колекторним струмом біполярного транзистора і напругою, доданим до переходу база-емітер:⁵⁸

$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right)$$

де: k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, q – заряд електрона, I_S – струм, що залежить від геометрії і температури переходу. (Це співвідношення справедливе, починаючи

⁵⁸ Линеверг Ф. Измерение температур в технике: справочник / под ред. Л.А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.

з декількох сотень мілівольт і не враховує деякі тонкі ефекти). Якщо ми візьмемо N транзисторів, ідентичних першому, і припустимо, що I_c , загальний струм колектора, порівну розподілений між усіма транзисторами, то виявимо, що нове значення напруги база-емітер буде визначено співвідношенням:

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_c}{N \cdot I_s}\right)$$

Жодна з цих ланцюгів не використовується в якості самостійного датчика через сильну температурну залежність струму I_s , але якщо ми пропустимо рівні струми через один біполярний транзистор і через N ідентичних йому, то різниця між цими двома база-емітерними напруженнями пропорційна абсолютній температурі і не залежить від I_s .⁵⁹

$$\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_c}{I_s}\right) - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_c}{N \cdot I_s}\right)$$

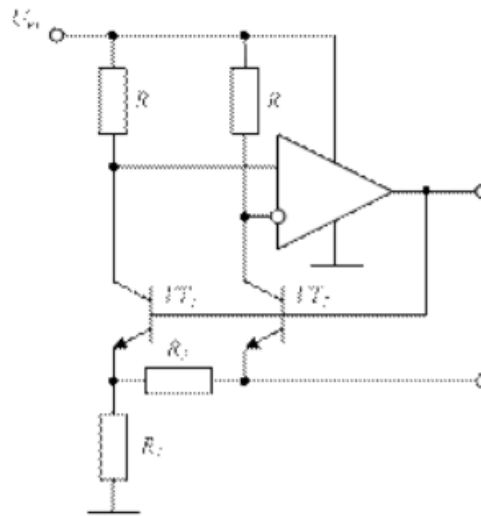


Рис. 1. Осередок Брока

Ланцюг, показаний на рис. 1, описується наведеним вище співвідношенням і відомий як осередок Брока (Brokaw Cell). Напруга $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N$ докладено до резистора R_2 . Струм емітера Q_2 визначається як $\Delta V_{BE} / R_2$. Приблизно цієї ж величині дорівнює і колекторний струм I_2 цього транзистора. Протікаючи через резистор R , він створює на ньому падіння напруги, яка дорівнює $\Delta V_{BE} \cdot R / R_2$. Отже, напруга на інвертуючому виведенні ОУ рівна $V_{INV} = V_{IN} \Delta V_{BE} \cdot R / R_2$.⁶⁰

Напруга на інвертуючому виведенні рідна тій же величині з точністю до десятків мікрівольт, а оскільки в колекторі Q_1 встановлено резистор, який має все той же номінал R , то струми I_1 і I_2 виявляються рівними. Вони підсумовуються на резисторі R_1 . Падіння напруги на ньому пропорційно абсолютній температурі (PTAT) і визначається за формулою:

$$V_{PTAT} = \frac{2 R_1 (V_{BE} - V_N)}{R_2} = 2 \frac{R_1}{R_2} \frac{kT}{q} \ln(N)$$

Опорна напруга, що виробляється осередком $V_{BANDGAP}$, знімається з бази Q_1 і є сумою $V_{BE}(Q_1)$ і V_{PTAT} . Як і V_{PTAT} , $V_{BE}(Q_1)$ також лінійно залежить від абсолютної температури, але зі зростанням її падає (в оригіналі ця залежність названа комплементарною до абсолютної температури, СТАТ). Сума V_{PTAT} і $V_{СТАТ}$ при певних значеннях відносини R_1/R_2 і N виявляється незалежною від температури (коли ставлення R_1/R_2 і N таке, що напруга на виході ОУ одно 1,205 В). Описаний ланцюг є базовим і найбільш часто використовуваний в

⁵⁹ Линеваг Ф. Измерение температур в технике: справочник / под ред. Л.А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.

⁶⁰ Шитиков А. Цифровые датчики температуры от Dallas Semiconductor // Компоненты и технологии. – 2001. – №2 [Электронный ресурс]. http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_02_48.pdf, свободный (дата обращения: 11.06.2018).

схемотехніці напівпровідникових термодатчиків.

Концепція, реалізована при побудові вищеописаного осередку Брока, може використовуватися в якості базової для різних інтегральних температурних датчиків, що формують на виході температурно залежні струми або напруги. AD592 і TMP17 є датчиками струму з крутизною перетворення 1 мкА/К. Ці сенсори не вимагають додаткового калібрування і випускаються з кількома градаціями точності. AD592 випускається в трьох варіантах.

Найточніший (AD592CN)⁶¹ має максимальну похибку при 25°C з всього ±0,5°C с і не більше ±1,0°C з у всьому діапазоні температур від – 25 до ±105°C. Нелінійність не перевищує ±0,35°C. TMP17 випускається в двох варіантах. Більш точний (TMP17F) має максимальну похибку при 25°C з не більш ±2,5°C і не більше ±3,5°C при температурі від – 40 до +105°C. Типова нелінійність ±0,5°C. AD592 випускається в корпусі TO-92, а TMP17 в SO-8. В деяких випадках бажано, щоб вихідна напруга температурного датчика була б залежною від напруги живлення. AD22103 має вихідну напругу, яка зворотно пропорційна щодо напруги живлення (номінальне значення 3,3 В) і відповідає даному рівнянню:

$$V_{\text{OUT}} = \frac{V_S}{3.3} V = 0.25 V + \frac{28 \text{ mV}}{^{\circ}\text{C}} \cdot T_A$$

TMP35/TMP36/TMP37 – низьковольтні (2,7 В...5,5 В) температурні датчики з крутизною перетворення 10 мВ/°C (TMP35/36) або 20 мВ/°C (TMP37), випускаються в корпусах SOT-23 (5-pin), SO-8 або TO-92. Струм споживання їх менше 50 мкА, що забезпечує вкрай низьке власне тепловиділення (вноситься похибка менш ніж 0,1°C в нерухомому повітрі). Режим зниженого споживання (shutdown) характеризується ще більш низьким струмом – до 0,5 мкА. TMP35 виробляє на виході 250 мВ при температурі +25 °C і працює в діапазоні від +10 до +125°C. TMP36 виробляє на виході 750 мВ при 25 °C, працюючи – від – 40 до +125°C, TMP35 і TMP36 мають крутизну перетворення 10 мВ /°C.

TMP37 призначається для застосування в режимі від +5 до +100 °C, забезпечуючи крутизну перетворення 20 мВ /°C і вихідну напругу 500 мВ при +25 °C. ADT45/ADT50 – температурні датчики напруги, упаковані в корпус SOT-23, що працюють при напружених від 2,7 до 12 в. Ці прилади спеціфіковані в діапазоні від – 40 до +125°C. Крутизна перетворення обох мікросхем – 10 мВ/°C. Типові значення точності калібрування – ±1°C при +25°C и ±2°C в діапазоні від – 40 до +125°C. ADT45 виробляє 250 мВ на виході при +25°C і застосовується при температурах від 0°C до +100°C.

ADT50 забезпечує 750 мВ при +25 °C і працездатна – від – 40 до +125°C. Якщо ADT45/ADT50 термічно захищені, то вони можуть використовуватися для будь-яких температурних вимірювань за умови, що температура навколишнього середовища лежить в діапазоні від -40 до +125°C. Якщо вони знаходяться в доброму тепловому контакті з поверхнею або приклеєні до неї, температура їх буде відрізнятися від температури поверхні не більше ніж на 0,01°C.

Слід звернути увагу на те, що будь-які дроти, що йдуть до датчика, діють на нього як теплові труби, вносячи похибку, якщо навколишній датчик середовища не ізотермічний. Для уникнення цього найкраще нанести на дроти, що йдуть до сенсору і на його виводи краплю термопровідної епоксидної смоли. Це застрахує ADT45/ADT50 від помилок за рахунок впливу температури навколишнього середовища. В корпусі SOT-23, тепловий опір перехід-корпус (junction-to-case) θ_{JC} рівний 180°C/Вт.

Теплове опір корпус-навколишнє середовище (case-to-ambient) θ_{CA} є різницею між θ_{JA} і θ_{JC} і визначається термічними характеристиками сполук (дроти, доріжки плати, припій тощо. д.). За відсутністю обдування, коли датчик припаяний до плати, θ_{JA} становить 300°C/ Вт. Потужність P_D , яка розсіюється датчиком, визначається доданою до неї напругою і споживається струмом (включаючи струм, поточний у навантаження). Вона виділяється

⁶¹ Шитиков А. Цифровые датчики температуры от Dallas Semiconductor // Компоненты и технологии. – 2001. – №2 [Электронный ресурс]. http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_02_48.pdf, свободный (дата обращения: 11.06.2018).

у вигляді тепла і збільшує температуру датчика у порівнянні з температурою навколишнього середовища. При цьому температура датчика буде рівною:⁶²

$$T_j = P_D(\theta_{JC} + \theta_{CA}) + T_A.$$

Таким чином, зростання температури припаюного до плати не навантаженого ADT45/ADT50 (в корпусі SOT-23) за відсутності обдуву, температурі середовища 25 °С і 5 вольтів живлення зі споживанням 60 мкА ($P = 300$ мкВт) становить менше ніж 0,09°С. З метою запобігання зростання температури датчика важливо знижувати струм навантаження, завжди підтримуючи його менш 100 мкА. Відгук на стрибкоподібну зміну температури у ADT45/ADT50 визначається тепловими супротивами, масою і теплоємністю кристала і корпусу.

Термічна маса корпусу залежить від того, чи знаходиться він у контакті з чимось, крім навколишньої атмосфери. Практично у всіх випадках термічна маса корпусу є фактором, що обмежує швидкодію термодатчика, і в описі може бути представлена за допомогою деякої постійної часу однополюсного ланцюга. Термічна маса нерідко розглядається як термічний еквівалент електричної ємності. Висновок живлення цих датчиків повинен шунтуватися на загальний провід за допомогою керамічного конденсатора ємністю 0,1 мкФ, що має дуже короткі відводи (наприклад, конденсатора для поверхневого монтажу) і, при можливості, розташованого якомога ближче до виводу живлення.

Так як ці термодатчики працюють при дуже маленькому струму, вони можуть піддаватися дуже сильному електричному впливу перешкод, що йдуть від навколишнього середовища, в зв'язку з чим дуже важливо мінімізувати ефекти EMI/RFI⁶³. Ефект від RFI на цих датчиках виявляється як аномальна зміна постійної напруги на виході при фільтрації від високочастотних шумів внутрішніх провідників і кристала ІС. У тих випадках, коли датчики використовують в умовах високочастотного випромінювання або перешкод від передавачів, танталовий електролітний конденсатор достатньої ємності (>2,2мкФ), установлений паралельно керамічній ємності 0,1 мкФ може підвищити захищеність датчика від перешкод.

Терморегулювання сьогодні є однією з найбільш яскравих і поширених областей застосування автоматики. Обладнання для керування тепловими процесами можна зустріти в кожному будинку, автомобілі або промисловому виробництві. Застосування сучасної електроніки дозволяє будувати прості і при цьому високофункціональні системи, завдяки використанню датчиків з цифровим виходом, мікроконтролерів та інших елементів. Реалізувати алгоритм терморегулювання в подібних галактиках також не складає особливої складності.

Для регулювання температури якого-небудь об'єкта можна на вибір використовувати кілька алгоритмів. В промислових системах найбільш часто зустрічається позиційне управління, або управління з ПІ скорочено ПІД законом. Його можна зустріти у величезній кількості пристроїв.

Практично всі сучасні напівпровідникові датчики температури мають вбудований вихід термостату, що дозволяє максимально спростити підсумкову систему. Але подібний підхід відрізняється неформованістю і складністю переналаштування. Вирішити цю проблему можна із застосуванням мікроконтролера і семисегментного індикатора.

Позиційне управління⁶⁴ за своєю суттю реалізує релейну логіку в класичною системою зі зворотним зв'язком. У такій системі вихідний сигнал не змінюється за амплітудою, а працює за принципом включено / виключено. Вихідний пристрій у цьому випадку легко реалізується за допомогою оптопара, симистора, комутуючого мережу та навантаження.

При досягненні температурою заданого значення, реле відключається і відповідно

⁶² Линеверг Ф. Измерение температур в технике: справочник / под ред. Л.А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.

⁶³ Microchip. Temperature Sensor Design Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21895d.pdf>, (дата обращения: 11.06.2018).

⁶⁴ Шитиков А. Цифровые датчики температуры от Dallas Semiconductor // Компоненты и технологии. – 2001. – №2 [Электронный ресурс]. http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_02_48.pdf, свободный (дата обращения: 11.06.2018).

відключає навантаження. Застосування симистор дозволяє комутувати мережеве напруження в області струмів $I_H < 20$ А і напружень $U_H = 600$ В, а використання оптопар дозволяє гальванічно розв'язати низьковольтну частину.

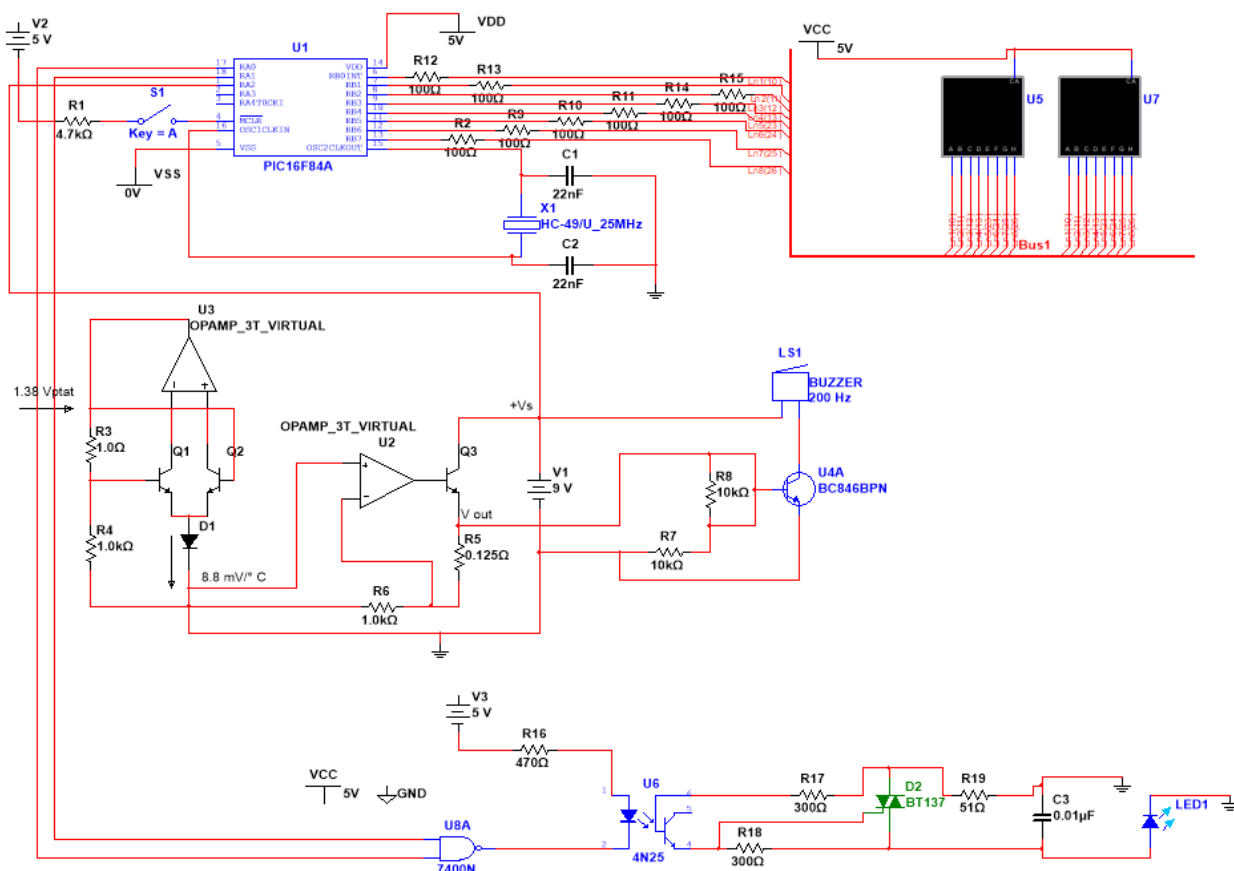


Рис. 2. Принципова схема мікропроцесорної системи

Основою термостата вибрано мікроконтролер PIC16F84A⁶⁵. Його характеристики найбільш оптимально підходять для створення простих вимірювальних пристроїв і пристроїв автоматики. Для тактування використаний зовнішній кварцовий резонатор на 25 МГц. Індикація температури виробляється в динамічному режимі світлодіодним індикатором із загальним катодом.

При побудові схеми використовувався датчик температури LM35 або аналогічні датчики серії TMP35, TMP36, TMP37⁶⁶. Особливості термодатчиків LM35 (TMP35-36-37):

1. Значення температури калібровано в шкалі Цельсія.
2. Лінійне значення напруги на виході з коефіцієнтом 10 мВ / °С.
3. Гарантована точність 0,5 °С (при 25 °С).
4. Параметри нормовані для повного діапазону температур – 55. +150 °С.
5. Зручні для використання в пристроях з віддаленим підключенням датчиків.
6. Низька ціна.
7. Працює в широкому діапазоні напруги живлення 4 – 30 В.
8. Споживаний струм менше 60 мкА.
9. Низький рівень власного розігріву – 0.08 °С при нерухомому повітрі.
10. Нелінійність тільки ±0.25 °С.
11. Низький вихідний опір – 0.1 Ом, при струмі навантаження 1 мА.

⁶⁵ Microchip. Temperature Sensor Design Guide [Електронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21895d.pdf>, (дата обращения: 11.06.2018).

⁶⁶ Макаренко В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI Multisim // ЭКис – Киев: VD MAIS, 2008, No 1.

На графіку показана залежність вихідної напруги від температури. Згідно з документацією, коефіцієнт напруги на виході дорівнює 10 мВ/°С. З цього випливає, що межі будуть рівні від – 550 мВ до + 1500 мВ, це показано на графіку.

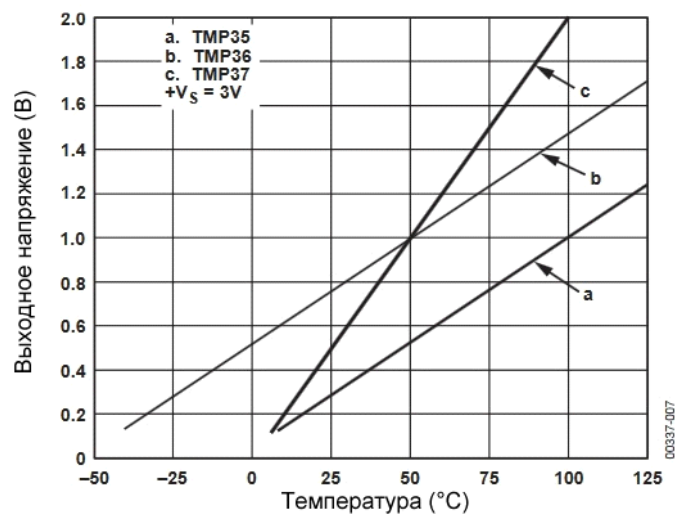


Рис. 3 результати дослідження. Графічні залежності вихідної напруги (Вольт) від температури, (°С) для різних датчиків серії TMP

Розроблена принципова схема температурного контролера на базі широко розповсюджених мікроконтролерів серії PIC, температурним перетворювачем на базі класичного осередку Брока⁶⁷, зі зручною крутизною перетворення в діапазоні від 5 мВ/°С до 30 мВ/°С. У схемі застосували транзисторно-діодну оптопару і симистор для комутації силового навантаження у вихідних ланцюгах. До мікроконтролеру підключаються дві пари восьмисегментних індикаторів, що дозволяє візуально відслідковувати температуру як в абсолютних одиницях °С, так і в HEX-кодах. Схема має як вбудований в мікроконтролер, так і зовнішній кварцовий генератор на резонаторі 25 МГц.

До основних переваг даної схеми можна віднести перешкодозахищеність від зовнішніх електромагнітних і теплових впливів, оскільки даний контролер може передавати/приймати інформацію по інтерфейсах LVDS/CAN, а саме це дозволяє будувати на базі таких схем багатопотокові широкосмугові пристрої з великою кількістю сенсорів (температурні, частотні, тиску, рівня радіації і т. д.).

В результаті досліджень прийшли до висновку про те, що застосування напівпровідникових датчиків температур дозволяє досягти високої точності за рахунок лінійної характеристики $U=f(T)$ та практичного браку власних шумів, оскільки у вхідних ланцюгах застосовуються МОП-структури. Однак, за графіком очевидний невеликий діапазон вимірюваної температури $T_{\min} = -25...0$ °С, а $T_{\max} = 85..110$ °С, що робить неможливим використання цих приладів у фізичних дослідженнях. Також залишається неясною передавальна характеристика даного класу приладів при впливу сонячної радіації.

References:

1. Линеверг Ф. Измерение температур в технике: справочник / под ред. Л.А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.
2. Макаренко В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI Multisim // ЭЖиС – Киев: VD MAIS, 2008, № 1.
3. Кунц Р.В. Разработка кроссплатформенного программного обеспечения для системы оперативного контроля жизнеобеспечения университетского кампуса / Р.В. Кунц, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин // Измерение, контроль, информатизация: матер. 13-й междунар.

⁶⁷ Линеверг Ф. Измерение температур в технике: справочник / под ред. Л.А. Чарихова. – М.: Металлургия, 1980. – 543 с.

науч.-техн. конф. – Т. 2 / под ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – С. 186–188.

4. Microchip. Temperature Sensor Design Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21895d.pdf>, (дата обращения: 11.06.2018).

5. Шитиков А. Цифровые датчики температуры от Dallas Semiconductor // Компоненты и технологии. – 2001. – №2 [Электронный ресурс]. http://kit-e.ru/assets/files/pdf/2001_02_48.pdf, свободный (дата обращения: 11.06.2018).

6. Multisim User Manual.pdf. <http://www.ni.com/pdf/manuals/374483d.pdf>