

## Аналіз сучасних засобів вимірювання температури

Основним напрямком розвитку сучасної техніки сенсорів є використання напівпровідникових матеріалів, інтегральної технології і розробка на їх основі мікроелектронних перетворювачів [1]. Зокрема перетворювачів температури, які є найважливішим різновидом сенсорів, оскільки більшість процесів, в тому числі і в повсякденному житті, регулюються температурою [2]. Проаналізуємо найбільш поширені сучасні засоби вимірювання температури.

### Напівпровідникові датчики температури

Вплив температури на електрофізичні параметри напівпровідників в основному виявляється в зміні концентрації носіїв заряду, що приводить до відповідної зміни електричної провідності [3]. На цьому принципі працюють напівпровідникові терморезистори. В якості напівпровідникових датчиків температури також використовуються діоди і транзистори, де зміна концентрації носіїв заряду приводить до зміни струму, що протікає через напівпровідниковий прилад [3].

Відомий пристрій для багатоточкового вимірювання температури [4], який використовується для температурних полів в силосах і бункерах, заповнених сипучими і займистими продуктами. Він містить одноперехідні транзистори 1, перші бази яких з'єднані з загальною шиною джерела живлення, а другі бази зв'язані зі змінними резисторами 3 і через діоди 4 з виходами блоку 5 комутації, емітери об'єднані з полюсом загального резистора 12. Генератор 2 виконаний на польових транзисторах 6 і 7, останній з яких має не менше двох затворів. Стік першого польового транзистора з'єднаний з одним із затворів другого польового транзистора і резистором 8. Другий затвор другого польового транзистора з'єднаний зі своїм витоком і резистором 9. витоки обох транзисторів з'єднані між собою через конденсатор 13, а з загальною шиною джерела живлення через резистори 10 і 11. Принципова схема пристрою зображена на рис. 1.

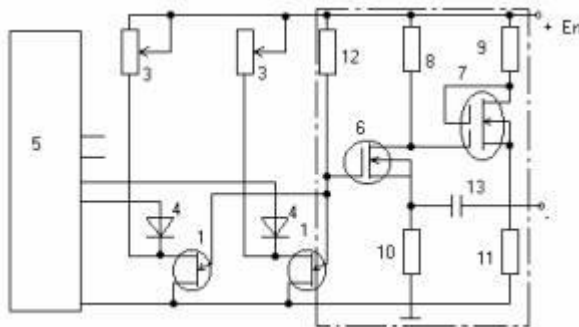


Рис. 1. - Принципова схема пристрою для багатоточкового вимірювання температури

Новизною пристрою є те, що з метою підвищення точності вимірювання температури і збільшення швидкодії, в нього введені напівпровідникові діоди по кількості датчиків температури, які виконані на одно перехідних транзисторах, а другі бази одно перехідних транзисторів з'єднані з загальною шиною джерела живлення.

Електронний термосенсор [5] дає можливість вимірювати з високою точністю як абсолютне значення температури в точці, так і різницю температури в двох точках. Він складається з двох термочутливих транзисторів 1 і 2 одноіменної структури, двох навантажувальних резисторів 3 і 4, включених в колекторні кола транзисторів 1 і 2, і двох змінних резисторів 5 і 6, призначених для калібрування температурних характеристик транзисторів 1 і 2 по двох параметрах: колекторні напрузі і струму бази. Наявність двох регулювань, що здійснюються за допомогою резисторів 5 і 6, дозволяє калібрувати термодатчик при двох значеннях температури транзисторів 1 і 2, зміщуючи їх температурні характеристики в двох точках. Схема термосенсор представлена на рис. 2.

Новизною термосенсора є те, що з метою підвищення точності вимірювання в нього введений додатковий змінний резистор, крайні виводи якого з'єднані з другими виводами постійних резисторів, а його середній вивід з'єднаний з одним виводом джерела живлення, другий вивід якого з'єднаний безпосередньо з емітерами термочутливий транзисторів, бази яких з'єднані з середнім виводом першого змінного резистора, крайні виводи якого з'єднані з колекторами термочутливих транзисторів.

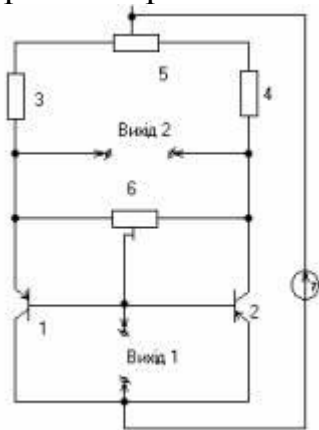


Рис. 2. - Електрична схема електронного термосенсор

Наступний сенсор температури [6] складається з біполярного транзистора 1, польового транзистора 2, терморезистора 3 і першого і другого дифузійного резисторів 4 і 5. Польовий транзистор 2 ввімкнений по схемі витокового повторювача, між витком якого і загальною шиною живлення ввімкнений перший дифузійний резистор 4, затвор польового транзистора 2 підключений до колектора біполярного транзистора 1 і терморезистору 3, другий вивід терморезистора 3 з'єднаний з загальною шиною, стік польового транзистора 2 пов'язаний з базою біполярного транзистора 1 і одним виводом другого джерела

живлення. Емітер біполярного транзистора 1 через третій дифузійний резистор 6 з'єднаний з полюсом джерела живлення. Схема сенсора приведена рис. 3.

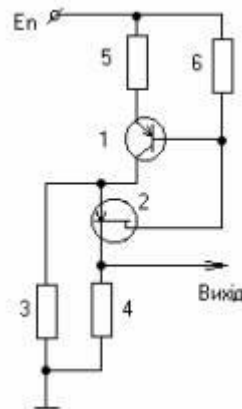


Рис. 3. - Принципова електрична схема сенсора температури

Новизною сенсора є те, що в нього введений третій дифузійний резистор, при цьому колектор біполярного і затвор польового транзисторів через терморезистор підключені до загальної шини, з якої через перший дифузійний резистор з'єднаний витік польового транзистора, стік якого і база біполярного транзистора підключені до шини живлення через другий дифузійний резистор, а третій дифузійний резистор включений між емітером біполярного транзистора і шиною живлення.

Напівпровідниковий вимірювач температури [7] застосовується для вимірювання температури в діапазоні 200-425 К. Він містить перший 1 і другий 2 узгоджені транзистори, виконані в одному кристалі, перший 3, другий 4 і третій 5 резистори, перший диференційний підсилювач 6, вимірювач 7 напруги і джерело 8 напруги. Вимірювач температури містить також другий диференційний підсилювач 9, третій транзистор 10, що має відносно узгодженої пари зворотній тип провідності, і четвертий 11, п'ятий 12 шостий 13 резистори. Схему вимірювача показано на рис. 4.

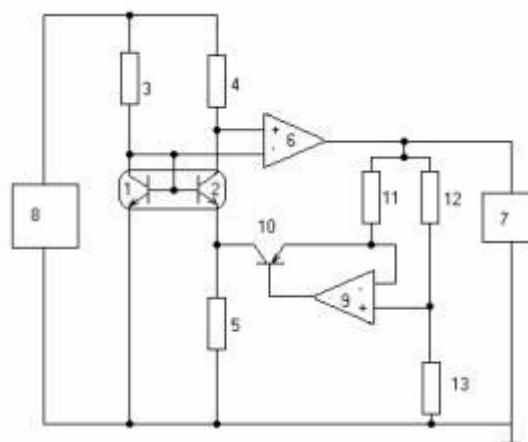


Рис. 4. - Напівпровідниковий вимірювач температури

Новизною пристрою є те, що з метою підвищення чутливості вимірювача температури в нього введені другий диференційний підсилювач, третій транзистор, що має відносно першого і другого транзистора зворотній тип

провідності, четвертий, п'ятий і шостий резистори. Перші виводи четвертого і п'ятого резисторів з'єднані з виходом диференційного підсилювача, другий вивід четвертого резистора з'єднаний з емітером третього транзистора і інвертуючим входом другого диференційного підсилювача, неінвертуючий вхід якого з'єднаний з другим виводом п'ятого резистора і першим виводом шостого резистора, другий вивід якого з'єднаний з загальною шиною. Вихід другого диференційного підсилювача з'єднаний з базою третього транзистора, колектор якого з'єднаний з емітером першого транзистора.

Датчики температури на основі діодів і транзисторів.

У датчиках температури на основі діодів і транзисторів використовують залежність параметрів р-n переходу в напівпровіднику від температури.

Історично першим температурозалежним параметром був зворотний струм діодів і транзисторів. Значення струму росте з температурою по експоненціальному закону із швидкістю порядку  $10\% \cdot K^{-1}$ . Проте, діапазон температур, в межах яких можливо використання зворотних струмів, вельми обмежений. Верхня температурна межа застосування визначається температурою їх теплового пробою.

Найбільшого поширення набуло використання прямих параметрів діодів і транзисторів [8]. Їх істотними перевагами перед зворотними є лінійність температурної залежності, широкий діапазон робочих температур, висока стабільність. Найчастіше для вимірювання температури використовується пряма напруга на р-n переході при майже постійному струмі емітера. Зміна прямої напруги складає близько  $2,5 \text{ мВ} \cdot K^{-1}$ . При підвищенні температури транзисторів р-n-p типу напруга емітер-база з області позитивних значень переходить в область негативних.

Так наприклад, датчик TS-560, розроблений ФТІ ім. А.Ф.Іоффе РАН (м. Санкт-Петербург) є напівпровідниковим діодом на основі арсеніду галію. Діапазон вимірювання такого датчика (4,2.500) К, основна погрішність 0,1%, чутливість (2.3) мВ/К, габаритні розміри 33 мм [8].

Відомі випадки використання як температурозалежного параметру коефіцієнта підсилення по струму на низьких і високих частотах [9]. Протеневисока чутливість коефіцієнта підсилення до температури і його залежність від передісторії, а також необхідність індивідуального градуювання у всьому діапазоні робочих температур обмежують застосування цього параметра при створенні термодатчиків.

На основі транзисторів, емітерний перехід яких включений в одне з плечей моста, створені термодатчики типу ТЕТ-1, ТЕТ-2 [2]. Перший тип використовується для вимірювання температури в польових умовах в діапазоні (-10.+40) °С з основною погрішністю не більше 1 К, другий – в діапазоні (-40.+80) °С з погрішністю не більше (0,3.2) К.

Температурні межі застосування транзисторів в термодатчиках значно ширші, ніж при використанні транзисторів за прямим призначенням. Обмеження застосування з боку високих температур настає унаслідок переходу домішкового напівпровідника у власний, зменшення напруги пробою і підвищення генерації носіїв в базовій області при від'ємних напругах. Застосування при низьких температурах визначається зменшенням концентрації основних носіїв через дезактивації легуючих домішок і зменшення коефіцієнта підсилення по струму.

Основним недоліком розглядуваних термодатчиків є складність отримання їх номінальної статистичної характеристики через розкид основних параметрів транзисторів: коефіцієнта підсилення по струму, опору базової області, струму витоку і ін. Аналіз і оцінка впливу розкиду вказаних параметрів на точність вимірювання температури при використанні номінальної статистичної характеристики, виконаний в [3], показали, що для прямих параметрів транзисторів з градуванням при одній температурі погрішність вимірювання в схемі із загальним емітером – не більше 2 і 50% при коефіцієнті підсилення по струму  $\beta \leq 30$  і  $\beta \geq 200$  відповідно.

Датчики температури на основі терморезисторів

Найбільш широкого поширення набули датчики на основі терморезисторів [2]. Принцип терморезистивного перетворення заснований на температурній залежності активного опору металів, сплавів і напівпровідників, що володіють високою відтворюваністю і достатньою стабільністю по відношенню до чинників, що дестабілізують. Температурну чутливість термометричного матеріалу прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом опору (ТКС).

Проте, термодатчики такого типу володіють рядом недоліків. Температурна залежність опору носить нелінійний характер, оскільки величина ТКС в робочому діапазоні температур змінює свою величину, іноді навіть на декілька порядків. Технологія виготовлення чутливих елементів не дозволяє набувати номінального значення опорів навіть для одного типа з розкидом менше (10...20)%. Крім того, значення температурного коефіцієнта опору терморезисторів однієї конфігурації можуть відрізнятися майже в два рази [8], унаслідок чого відсутня їх взаємозамінюваність.

Але основним недоліком термометрів цього типу є те, що вони, не дивлячись на проведення в процесі виготовлення штучного старіння, володіють низькою тимчасовою стабільністю і відтворюваністю.

Плівкові напівпровідникові датчики температури.

Поліпшення характеристик напівпровідникових датчиків температури і спрощення їх конструкції може бути досягнуте при використанні чутливих

елементів, виготовлених з тонких плівок напівпровідника, нанесеного на напівпровідникову або діелектричну підкладку. Виготовлення таких датчиків здійснюється масовими методами планарної технології, які забезпечують отримання значень номінальних опорів з достатньо високою точністю і, крім того, дозволяють використовувати при виготовленні лазерні методи підгонки номінальних опорів.

Основним недоліком датчиків на основі автоепітаксіальних структур «кремній на кремнії», а також на основі чутливих елементів з дифузійними кремнієвими терморезисторами є низька верхня межа робочих температур, що обумовлено різким погіршенням ізолюючих властивостей р-n переходу при температурах більш (410.430) К [9].

Датчики температури з частотним виходом

Перетворювач температури в частоту [10] використовується у вимірвальній техніці, в тому числі і в системах керування і контролю з цифровою індикацією. Перетворювач містить опір навантаження, тиристор 2, перший конденсатор 3, термочутливий елемент 4, перший 5 і другий 6 резистори, конденсатор 7, який виконаний змінним, джерело 8 живлення. Метою винаходу було підвищення ефективності за рахунок окремого регулювання частоти і амплітуди сигналів. Для цього між катодом тиристора 2 і виводом змінного резистора 6 ввімкнений конденсатор 7. Схема пристрою зображена на рис. 5.

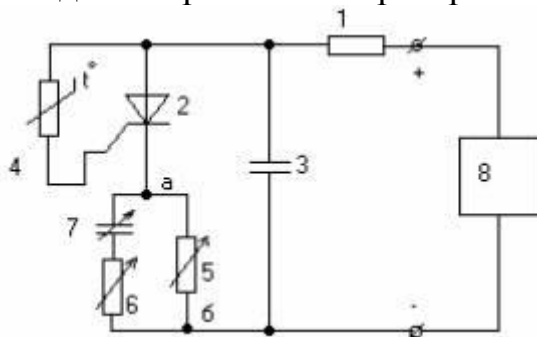


Рис. 5. - Схема перетворювача температури

Перетворювач температури в частоту містить в собі генератор імпульсів, який складається з послідовно з'єднаних тиристора і першого змінного резистора. Паралельно їм включений конденсатор, терморезистор, підключений одним виводом до керуючого електрода тиристора, а іншим до його анода, який через опір навантаження зв'язаний з полюсом джерела живлення. Другий його полюс підключений до другого виводу першого змінного резистора і першому виводу другого змінного резистора.

Новизною пристрою є те, що в нього введений другий конденсатор, перша обкладка якого з'єднана з другим виводом другого змінного резистора, а друга обкладка – з катодом тиристора.

Для вимірювання температури різних середовищ і тіл в складі багатоканальних вимірювальних систем і автоматичних установках використовують перетворювач температури в частоту [11] (рис. 6.). Принцип дії пристрою полягає в тому, що при проходженні струму через терморезистор 11 на ньому виникає падіння напруги, яке залежить як від струму, так і від вимірюваної температури. Величина струму регулюється джерелом 12 стабільного струму. Цим досягається залежність падіння напруги на терморезисторі 11 від температури. Сигнал з терморезистора 11 через дільник 8 напруги подається на затвор транзистора 2 і регулює частоту імпульсів генератора 1. З підвищенням температури терморезистора 11 падіння напруги на нього зменшується, що приводить до збільшення частоти вихідних імпульсів генератора 1. Відношення величин опорів резисторів 9 і 10 дільника 8 напруги задає зміщення на затворі транзистора 2.

Новизною перетворювача є те, що з метою підвищення точності перетворення в нього введено джерело стабільного струму, а генератор імпульсів виконаний на аналізі керованого інжекційно-польового транзистора. Дільник напруги виконаний у вигляді двох резисторів. Другий затвор аналога керованого інжекційно-польового транзистора з'єднаний з виходом дільника напруги, одне плече якого з'єднане з плюсом джерела живлення, друге – з точкою з'єднання перших виводів джерела стабільного струму і терморезистора, а другі виводи якого з'єднані відповідно з плюсом і мінусом джерела живлення.

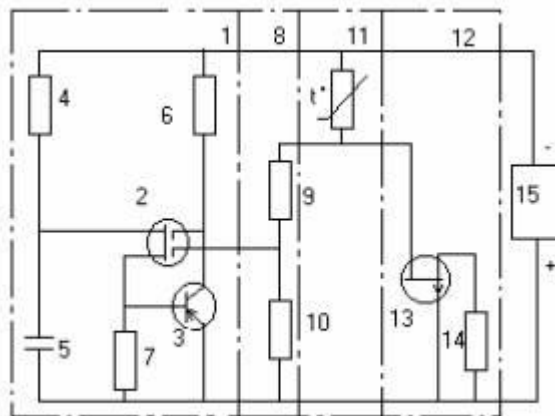


Рис. 6. - Електрична схема перетворювача температури в частоту

Проаналізуємо датчики температури, що базуються на транзисторних аналогах негатронів (АН) [12]. В якості чутливого елементу використовуються зазвичай терморезистори або діоди.

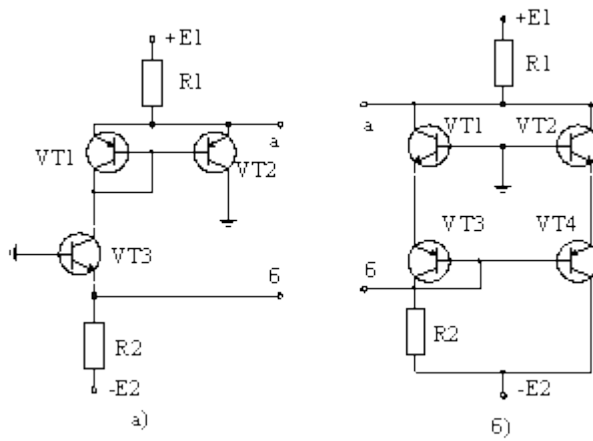


Рис. 7. - Схеми каскадних аналогів негатронів з відбивачами струму

При резистивному сенсорі його можна ввімкнути замість резистора, що відповідає за живлення транзисторів АН по постійному струмі, якщо на АН побудований ємнісний автогенератор (до клем а-б під однаємо конденсатор). Наприклад, при використанні АН, показаних на рис. 7, терморезистор вмикається замість резистора R2. при використанні діодів в якості сенсорів один діод або послідовне їх коло вмикаються послідовно з тим же резистором.

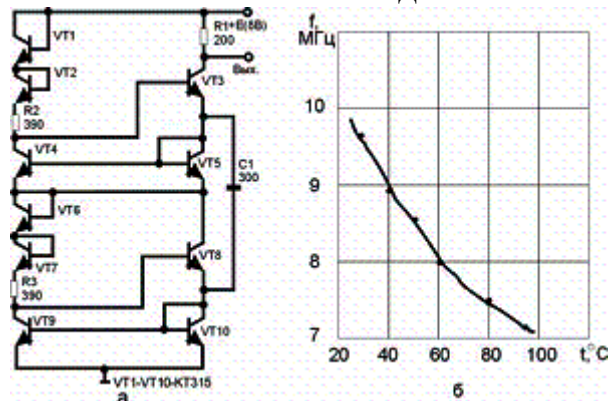


Рис. 8. - Схема датчика температури (а) і графік залежності частоти від температури (б)

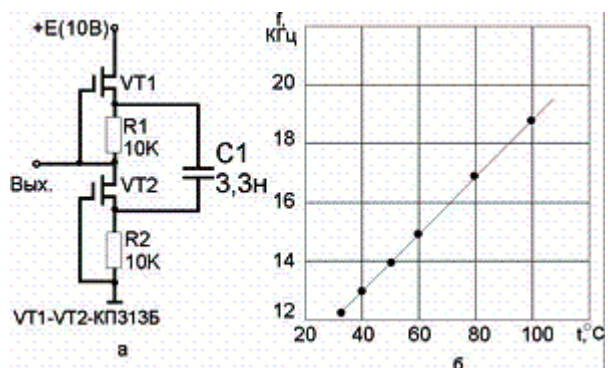


Рис. 9. - Схема датчика температури (а) і графік залежності частоти від температури (б)

На рис. 8 приведено приклад датчика температури з діодними сенсорами (VT1, VT2, VT6, VT7). Тут струм, що протікає через транзистори, при R2=R3 буде



$$I = \frac{0.5 \cdot E - 4 \cdot U_{\text{дз}}}{R_2}.$$

Оскільки напруга  $U_{\text{дз}}$  з ростом температури зменшується на  $2,2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , то даний струм зростає, змінюється ВАХ між клемми а-б і, відповідно, частота автогенератора [13]. З приведеного на рис. 8, б графіку можна визначити, що чутливість датчика складає  $-0,35 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Якщо в АН використовувати МДН-транзистори, параметри яких сильно залежать від температури, то ці транзистори, що входять в АН, одночасно можуть використовуватись і сенсорами. Приклад такого датчика температури приведено на рис. 9. чутливість складає  $+0,73 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . При використанні інших схем АН графік залежності частот від температури не завжди є лінійним. Зрозуміло, що в якості сенсора може використовуватись і сегнетоконденсатор. Проте в твердотільному виконанні найпростіше всього виготовити датчик температури з використанням діодів.

Проаналізувавши відомі вимірювачі температури [1...13] можна зробити висновок, що основними недоліками таких сенсорів є складність будови, тобто наявність великої кількості складових елементів, що при сучасному принципі мініюаризації технологій є не припустимим. Крім того, розглянуті вимірювачі містять забагато ланцюгів перетворення, що вносять додаткові похибки, а також збільшують час перетворення. Ще одним недоліком є невисока чутливість пристроїв. Проблеми існуючих пристроїв вимірювання температури можна подолати шляхом використання мікроелектронних частотних перетворювачів температури на основі транзисторних структур з від'ємним опором [14].

Перетворювачі температури на основі структур з від'ємним опором

Дослідження температурної залежності імпедансу напівпровідникових приладів з від'ємним опором показали результати, що подають надію з погляду можливості побудови на їхній основі автогенераторних первинних вимірювальних перетворювачів [15, 16]. При цьому інформативним параметром може бути як амплітуда, так і частота коливань генератора. Практична реалізація термочутливих генераторів гармонійних коливань відповідає більш високим вимогам по стабільності і точності перетворення температури в частотний сигнал у порівнянні з розповсюдженими релаксаційними генераторами.

Транзисторні структури, які мають від'ємний диференційний опір, можна використати в якості первинних перетворювачів температури, при цьому значно підвищити їх чутливість і точність вимірювання. Конструктивно вони виконуються у вигляді структури, яка складається із двох біполярних транзисторів, причому в електричну схему цієї структури можливо включити термочутливий напівпровідниковий або металевий опір, що розширює діапазон вимірюваних температур.

Для вивчення властивостей термочутливих частотних перетворювачів необхідно розробити математичні моделі, на базі яких можна отримати

залежність вольт-амперної характеристики, активної і реактивної складових повного опору структури, частоти генерації від дії температури, від режимів живлення, виконати експериментальні дослідження, що планується виконати в подальших роботах.

#### Література:

1. Виглеб Г. Датчики. –М.: Мир, 1989.
2. Шашков А. Г. Терморезистори і їх застосування. –К.: Наука, 1997. – 156 с.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 1 Пер.сангл.2-е перераб.доп.изд. -М.: Мир, 1984.-456с.
4. Патент СРСР № 1534334, МКИ G01K 7/00. Устройство для многоточкового измерения температуры - 17.11.87.
5. Патент Япония 1597596, МКИ G01K 7/00. Электронный термодатчик – 21.01.88.
6. Патент СРСР № 1714390, МКИ G01K 7/14. Датчик температуры - 10.01.90.
7. Патент СРСР № 1606876, МКИ G01K 7/00. Полупроводниковый датчик температуры - 28.12.87.
8. Фогельсон И. Б. Транзисторные термодатчики. –М.: Советское радио, 1972.
9. Папков В. С. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе. –М.: Энергия, 1979. – 351 с.
10. Патент СРСР № 1352245, МКИ G01K 7/14. Преобразователь температуры в частоту - 17.12.85.
11. Патент СРСР № 1538061, МКИ G01K 7/14. Преобразователь температуры в частоту - 01.07.87.
12. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: Учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 153 с.
13. Коноплев Б. Г., Негоденко О. Н., Кошелев С. Г., Рындин Е. А. Полупроводниковые трансдюсеры температуры с частотным выходом на аналогах негатрона// Труды НТК Датчик-95. Крым, 1995 С. 342.
14. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Вербицкий В. Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – 195с.
15. Осадчук В.С. Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів, транзисторних схем.-Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 1999.-275с.
16. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. -303с.