

# РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

Виконав: студент 1-го курсу, групи РТ-16сп  
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка  
Шевченко О.В.

Керівник: д.т.н., проф. Осадчук О.В.

- ▶ **Метою роботи** є покращення метрологічних показників радіовимірювальних перетворювачів температури з частотним вихідним сигналом, зокрема завадостійкості, чутливості точності вимірювання, технологічно сумісних з мікроелектронною елементною базою.
- ▶ **Об'єктом дослідження** є процес перетворення температури у частотний сигнал, що дозволяє розв'язати задачу розбудови радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів з поліпшеними метрологічними показниками.
- ▶ **Предмет дослідження** - статичні і динамічні характеристики радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів температури на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором.

- ▶ **Актуальність теми.** Характеристики перетворювачів визначають точність і надійність систем управління і регулювання, приладів контролю технологічних процесів, характеристик навколишнього середовища, безпеку роботи промислових установок тощо. Тому до перетворювачів температури висувуються жорсткі вимоги. Вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити, вагу та енергоспоживання, бути сумісними з сучасними ЕОМ та мати можливість виготовлення за стандартною інтегральною технологією. Перспективним науковим напрямком є розробка та створення первинних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення “температура-частота”, на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від’ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкцій аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити “інтелектуальні” вимірювальні перетворювачі в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та первинного перетворювача.
- ▶ Тому, необхідність розробки теоретичних підходів до створення радіовимірювальних первинних перетворювачів температури з частотним виходом на основі реактивних властивостей напівпровідникових приладів з від’ємним опором, а також розробки схем, конструкцій, експериментального дослідження параметрів, оцінюванню їх метрологічних характеристик, розробки мікропроцесорної системи вимірювання температури в промисловості з використанням частотних перетворювачів температури є актуальним на даний час.

# АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

Термометрична властивість	Назва приладу	Межі тривалого вимірювання, °С	
		Нижній	Верхній
Теплове розширення	Рідинні скляні термометри	-190	600
Зміна тиску	Манометричні термометри	-160	600
Зміна електричного опору	Електричні термометри опору	-200	500
	Напівпровідникові термометри опору (термістори, терморезистори)	-90	180
Термоелектричні явища (термо - ЕРС)	Термоелектричні термометри (термопари) стандартизовані	-50	1600
	Термоелектричні термометри (термопари) спеціальні	1300	2500
Теплове випромінювання	Оптичні пірометри	700	6000
	Радіаційні пірометри	20	3000
	Фотоелектричні пірометри	600	4000
	Колірні пірометри	1400	2800

# Частотні сенсори температури

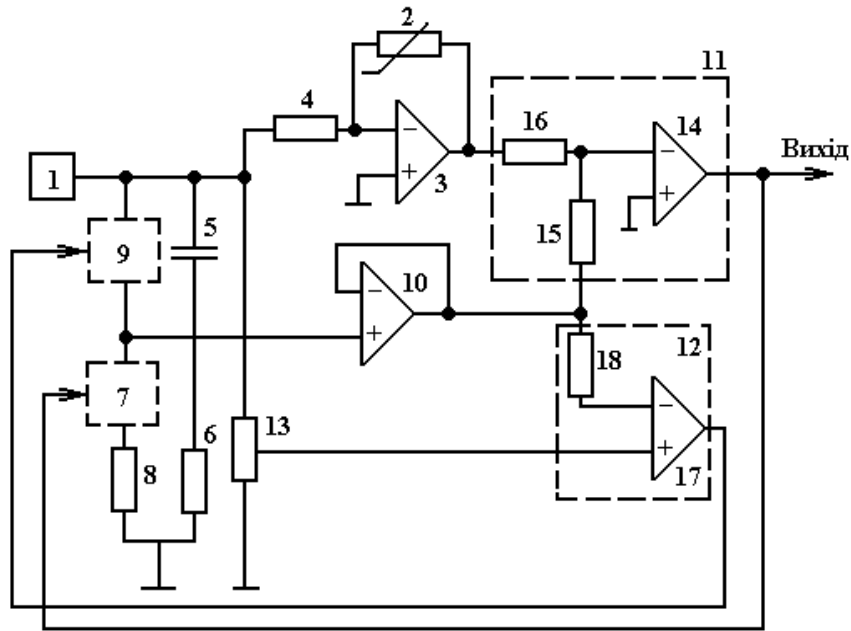
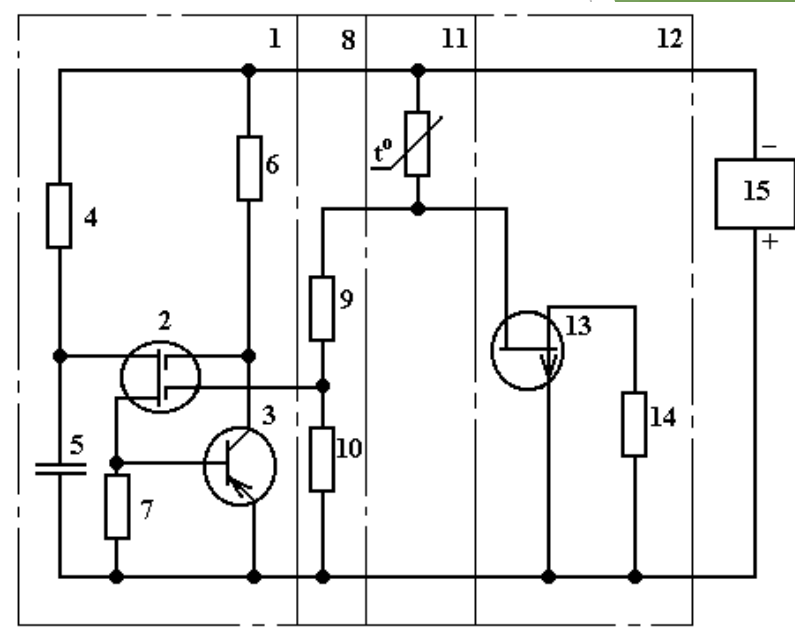


Схема пристрою перетворення температури в частоту:

1 - джерело опорної напруги; 2 - термоперетворювач; 3 - перший підсилювач; 4, 6, 8, 15, 16, 18 - резистори; 5 - конденсатор; 7 - перший ключ; 9 - другий ключ; 10 - повторювач напруги; 11 - перший компаратор; 12 - другий компаратор; 13 - потенціометр; 14 - другий підсилювач; 17 - третій підсилювач



Електрична схема перетворювача температури в частоту:

1- генератор імпульсів; 2 - польовий двозатворний транзистор; 3 - біполярний транзистор; 4, 7 - резистор; 5 - конденсатор; 6 - резистор навантаження; 8 - дільник напруги, що складається з резисторів 9 і 10; 11 - терморезистор; 12 - джерело стабільного струму, виконане на польовому транзисторі 13 і резисторі 14; 15 - джерело живлення

## ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ У БІПОЛЯРНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ ПРИ ДІЇ ТЕМПЕРАТУРИ

- При малих зворотних напругах основною причиною температурної залежності бар'єрної ємності є залежність висоти потенційного бар'єра  $\varphi_k$  від температури. При збільшенні напруги зменшується вплив температурної залежності  $\varphi_k$  на температурний коефіцієнт (ТК) бар'єрної ємності  $\Lambda$ :

$$\Lambda = \frac{1}{C_B} \frac{\partial C_B}{\partial T} = \frac{1}{2} \left[ \xi - \frac{\varphi_k}{-U + \varphi_k} \zeta \right]$$

Де  $C_B$  - бар'єрна ємність;  $T$  - абсолютна температура;  $U$  - постійна напруга на р-п переході;

$\xi$  - ТК відносної діелектричної проникності матеріалу (для Si:  $\xi = 1,5 - 2,0 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ );

$\zeta$  - ТК  $\varphi_k$  (для Si р-п переходу  $\zeta = 1,0 - 1,6 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ ).

Отже, бар'єрна ємність слабо залежить від температури і її недоцільно використовувати для побудови частотних датчиків. Значно сильніше така залежність виявляється в дифузійній ємності

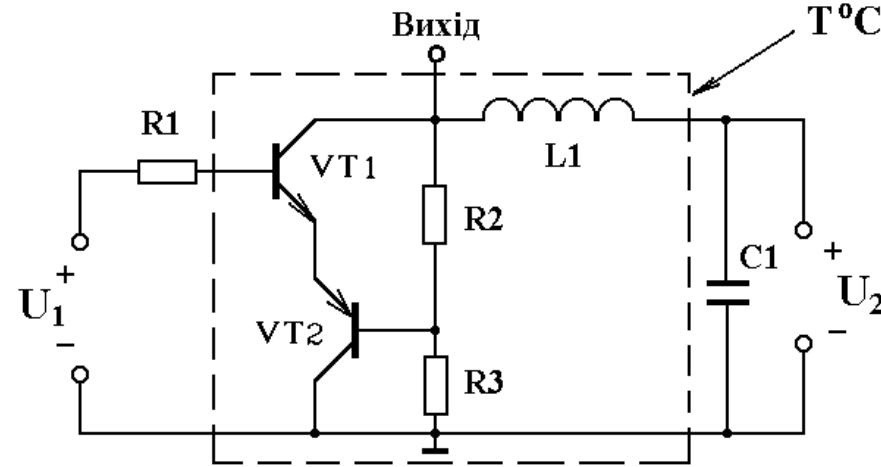
$$\lambda = \frac{1}{C_D} \frac{\partial C_D}{\partial T} = -\frac{1}{T} + \chi$$

де  $\lambda$  - ТК дифузійної ємності  $C_D$ ;  $\chi$  - ТК часу життя носіїв заряду ( $\chi = 1 - 10 \% / ^\circ\text{C}$ ).

Тоді  $\lambda = 0,1 - 5 \% / ^\circ\text{C}$ , що слугує переконливою підставою для використання  $C_D$  як інформативного параметру датчиків температури.

## РОЗРОБКА РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

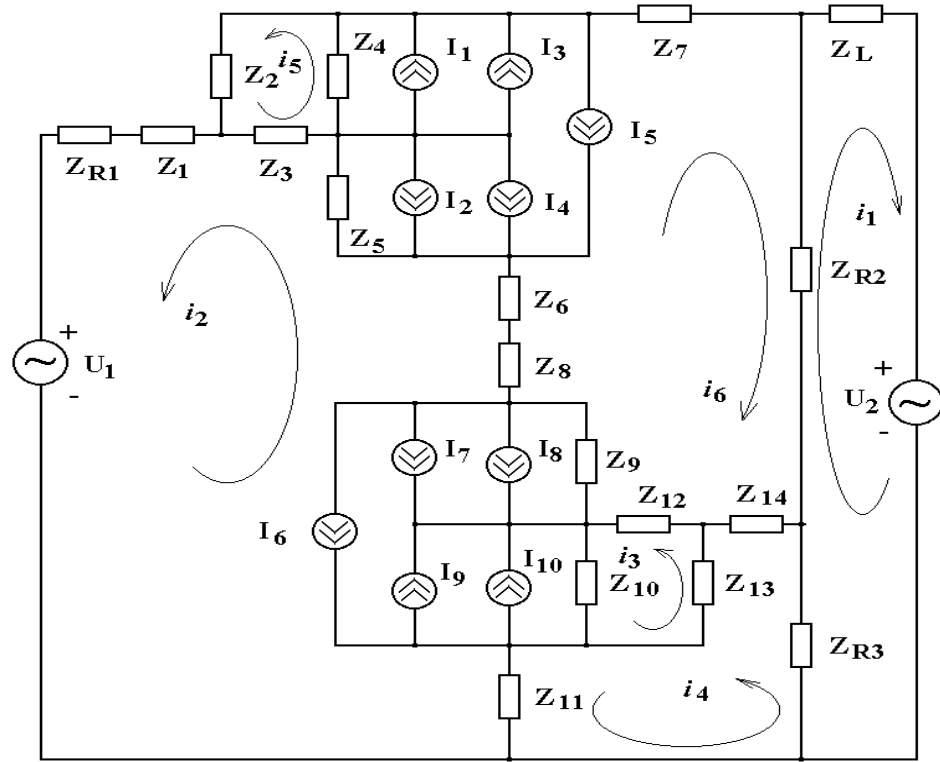
- Схема термочутливого перетворювача складається з двох біполярних транзисторів, живлення яких здійснюють джерела постійної напруги  $U_1$  і  $U_2$ . У даній транзисторній структурі, на електродах колектор-колектор транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$ , існує від'ємний опір.



Електрична схема частотного перетворювача температури на основі біполярних транзисторів

Підключення зовнішньої індуктивності до електродів колектора дозволяє створити генератор електричних коливань, частота генерації якого однозначно залежить від температури.

Зміна температури навколишнього середовища впливає на різні параметри і характеристики термочутливих біполярних транзисторів, а саме: на коефіцієнт підсилення струму, зворотні струми переходів емітера і колектора, об'ємний опір бази, емітера і колектора та інші параметри, що відбивається на зміні елементів еквівалентної схеми від температури.



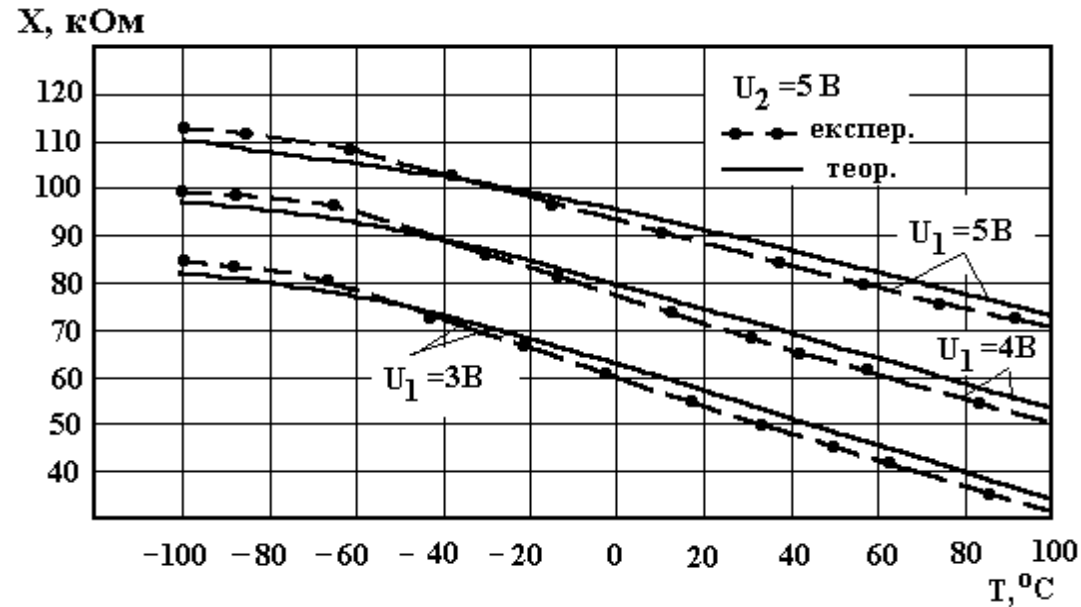
Еквівалентна схема частотного перетворювача температури

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_{bc2}(T); & I_2 &= I_{bs2}(T); & I_3 &= I_{bc1}(T) / \beta_R(T); \\
 I_4 &= I_{bs1}(T) / \beta_F(T); & I_5 &= I_{bs1}(T) - I_{bc1}(T) / Q; & I_6 &= I_{10}; \\
 I_7 &= I_8; & I_9 &= I_9; & I_{10} &= I_7; & I_{11} &= I_6; \\
 Z_L &= j\omega L; & Z_{R1} &= R_1; & Z_{R2} &= R_2; & Z_{R3} &= R_3; \\
 Z_1 &= R'_b + j\omega L_b; & Z_2 &= -j / \omega C_{bx}(T); & Z_3 &= R_{bb}(T); & Z_4 &= -j / \omega C_{jbc}(T); \\
 Z_5 &= -j / \omega C_{jbs}(T); & Z_6 &= R'_e + R_e(T) + j\omega L_e; & Z_7 &= R'_c + R_c(T) + j\omega L_c; & Z_8 &= Z_{14}; \\
 Z_9 &= Z_{13}; & Z_{10} &= Z_{12}; & Z_{11} &= Z_9; & Z_{12} &= Z_4; & Z_{13} &= Z_5; & Z_{14} &= Z_7.
 \end{aligned}$$



- Функція перетворення описується рівнянням, яке отримано методом Ляпунова на основі системи рівнянь Кірхгофа

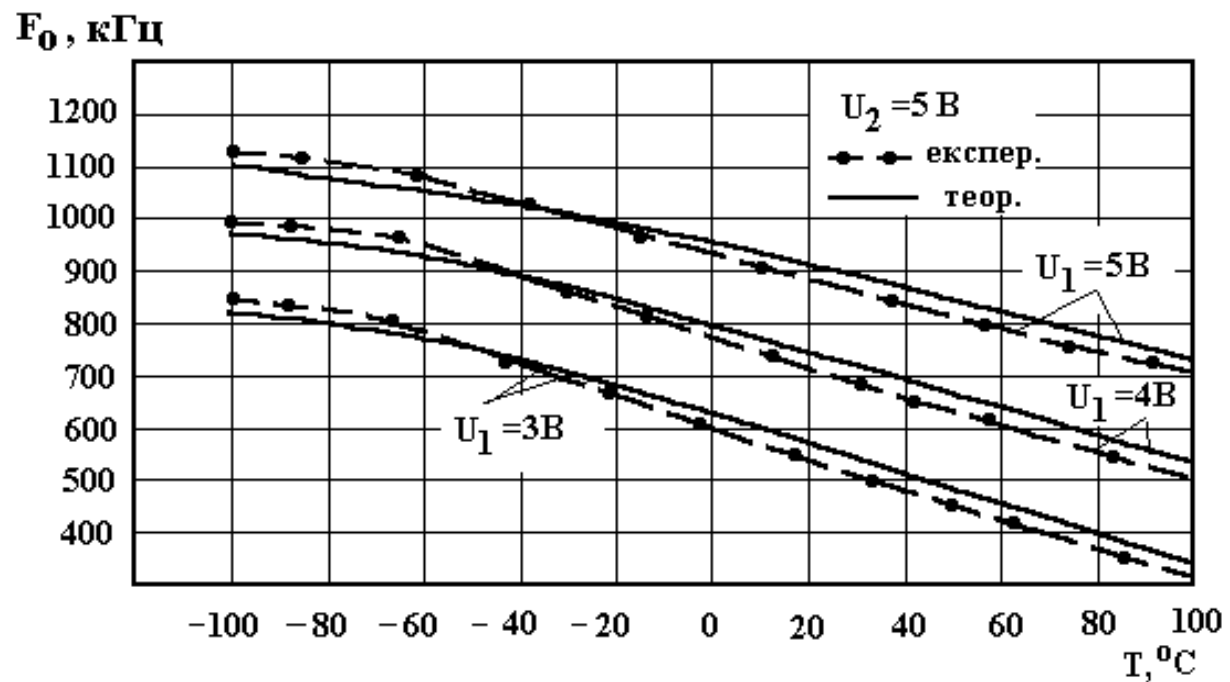
$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L}} \pi$$



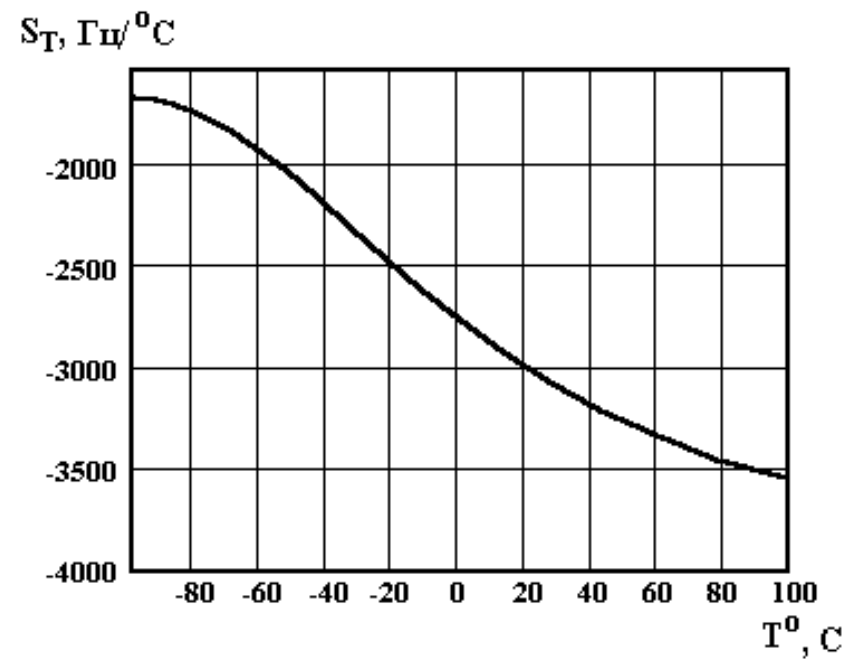
Теоретична і експериментальна залежність реактивної складової повного опору від температури

- Чутливість перетворювача визначається

$$S_T = \frac{\sqrt{2} \left[ \frac{\frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} + \frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T}}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L} - \frac{A_1 \left( \frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)^2 C_{jbc}(T)L} - \frac{A_1 \left( \frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)^2 L} \right]}{4\pi \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L}}}} \quad , \text{де } A_1 = C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T)$$



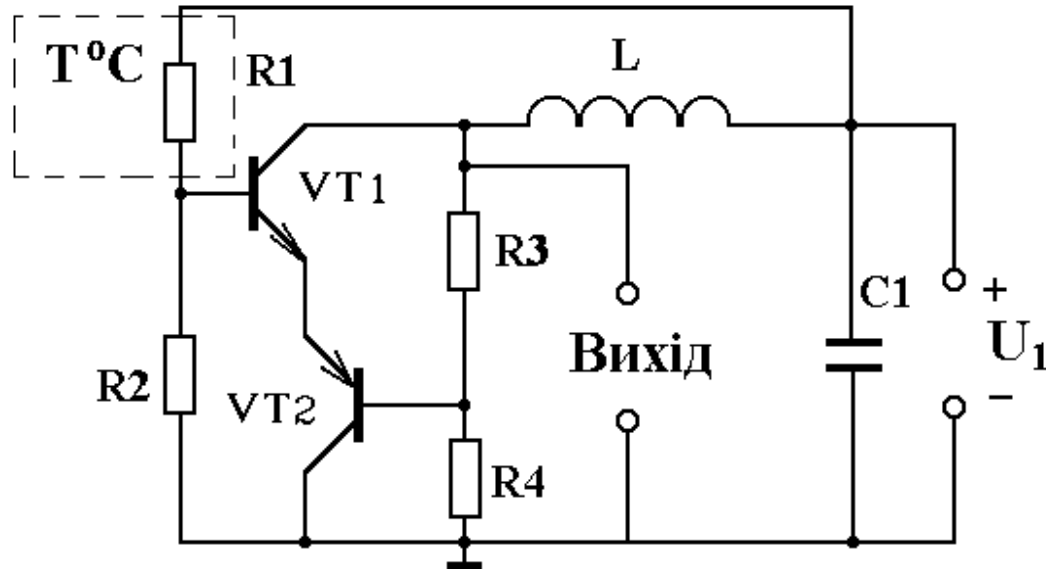
Теоретична та експериментальна залежність частоти генерації від температури



Залежність чутливості від температури

## Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з термоопором

- Для розширення діапазону вимірюваних температур як в сторону зростання (+800 °С), так і в сторону зменшення (-180 °С) в структуру біполярних транзисторів, а саме в коло позитивного зворотного зв'язку включався термоопір. Електрична схема перетворювача показана на рис.



Електрична схема перетворювача з термоопором

Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(R_t(T)^2 C_t^2 - C_{vx} L) + \sqrt{(R_t(T)^2 C_t^2 - C_{vx} L)^2 + 0.4 C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}}{C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}} \cdot \pi$$

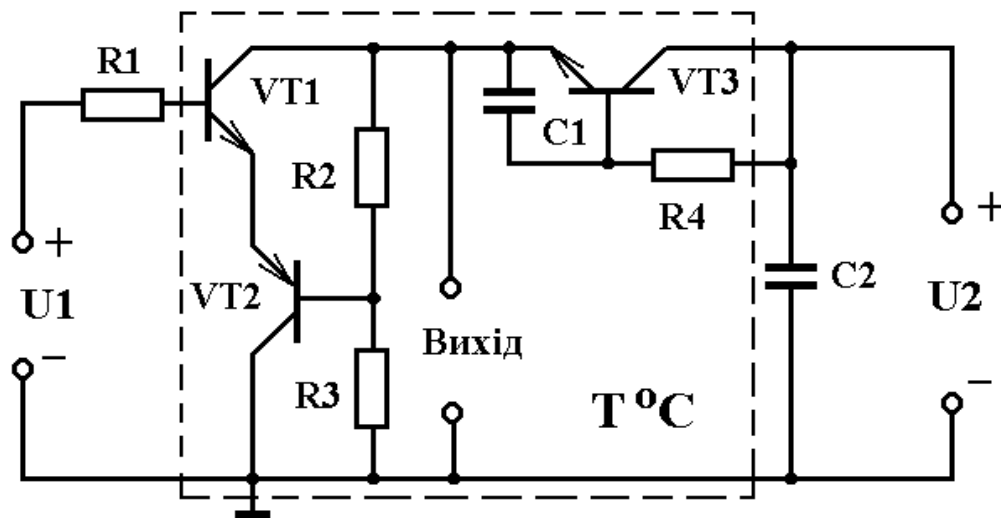
Функція чутливості описується рівнянням

$$S_T = \frac{1}{4} \left[ \frac{2R_t(T)C_t^2 \frac{\partial R_t(T)}{\partial T} + \frac{1}{2} \frac{4A_1 R_t(T)C_t^2 \frac{\partial R_t(T)}{\partial T} + 0.8C_{vx} L R_t(T)C_t^2 \frac{\partial R_t(T)}{\partial T}}{\sqrt{A_1^2 + 0.4C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}} - \right. \\ \left. -2 \frac{(R_t(T)^2 C_t^2 - C_{vx} L + \sqrt{A_1^2 + 0.4C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}) \frac{\partial R_t(T)}{\partial T}}{C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2} \right] \cdot \pi \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + 0.4C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}}{C_{vx} L R_t(T)^2 C_t^2}}$$

де  $A_1 = R_t(T)^2 C_t^2 - C_{vx} L$

## Частотний перетворювач температури на основі біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

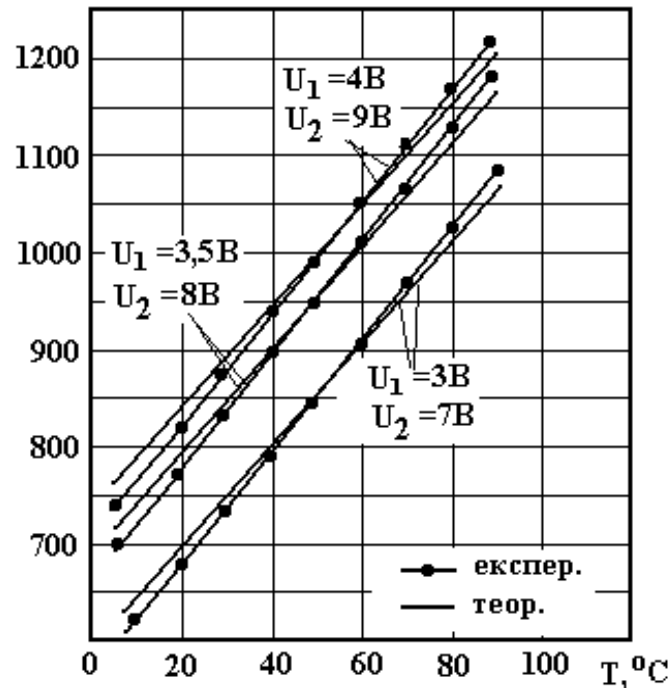
- Виконання температурного радіовимірювального перетворювача у вигляді інтегральної схеми потребує застосування плівкової технології для виготовлення пасивного індуктивного елемента у вигляді спіралі, проте її добротність має невелике значення і, по-друге, її розміри на частотах до  $10^6$  Гц несумісні з розмірами інтегральної схеми перетворювача. Тому для вирішення цієї проблеми запропоновано використати індуктивний характер повного опору біполярного транзистора з RC-колом, яке легко виконується у вигляді інтегральної схеми. Отже, схема радіовимірювального перетворювача температури з активним індуктивним елементом показана на рис.



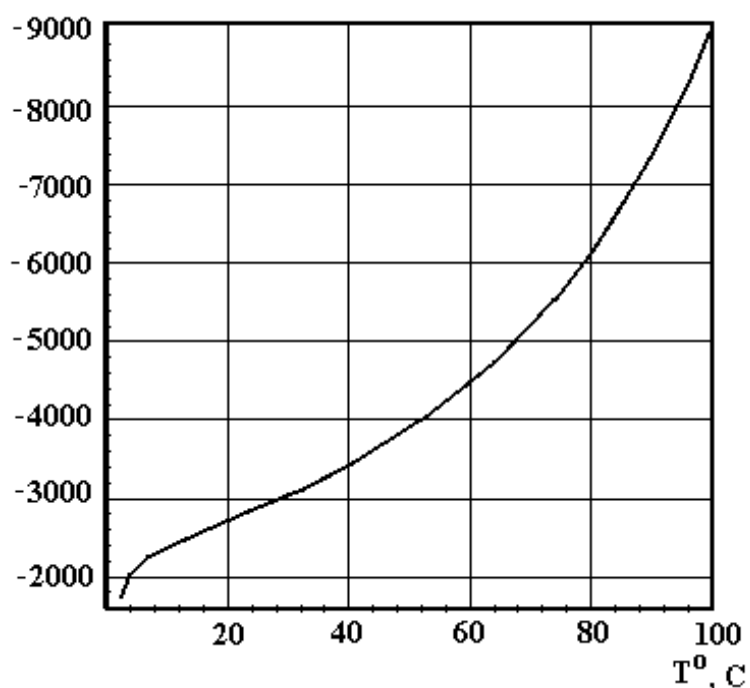
$$F_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L_{екс}(T)}}} \cdot \pi$$

Схема частотного перетворювача температури на основі біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

$F_0$ , кГц



$S_T$ , Гц/°C



Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від температури

Залежність чутливості перетворювача з активною індуктивністю від температури

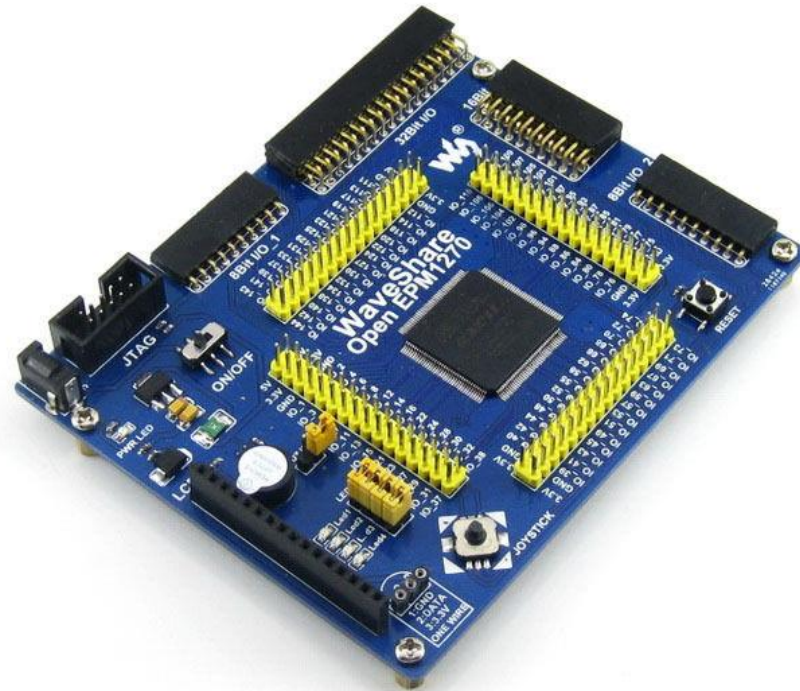
Чутливість радіовимірювального перетворювача температури з активним індуктивним елементом визначається на основі

$$S_T = \frac{\sqrt{2}}{4} \left( \frac{\frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} + \frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T}}{C_{jbe}(T)C_{jbc}(T)L_{de\alpha}(\dot{\omega})} - \frac{A_1 \left( \frac{\partial C_{jbe}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T)^2 C_{jbc}(T) L_{de\alpha}(\dot{\omega})} - \frac{A_1 \left( \frac{\partial C_{jbc}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T) C_{jbc}(T)^2 L_{de\alpha}(\dot{\omega})} - \frac{A_1 \left( \frac{\partial L_{de\alpha}(T)}{\partial T} \right)}{C_{jbe}(T) C_{jbc}(T)^2 L_{de\alpha}(\dot{\omega})} \right) / \pi \sqrt{\frac{2(C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T))}{C_{jbe}(T) C_{jbc}(T) L_{de\alpha}(\dot{\omega})}}$$

де  $A_1 = C_{jbe}(T) + C_{jbc}(T)$ .

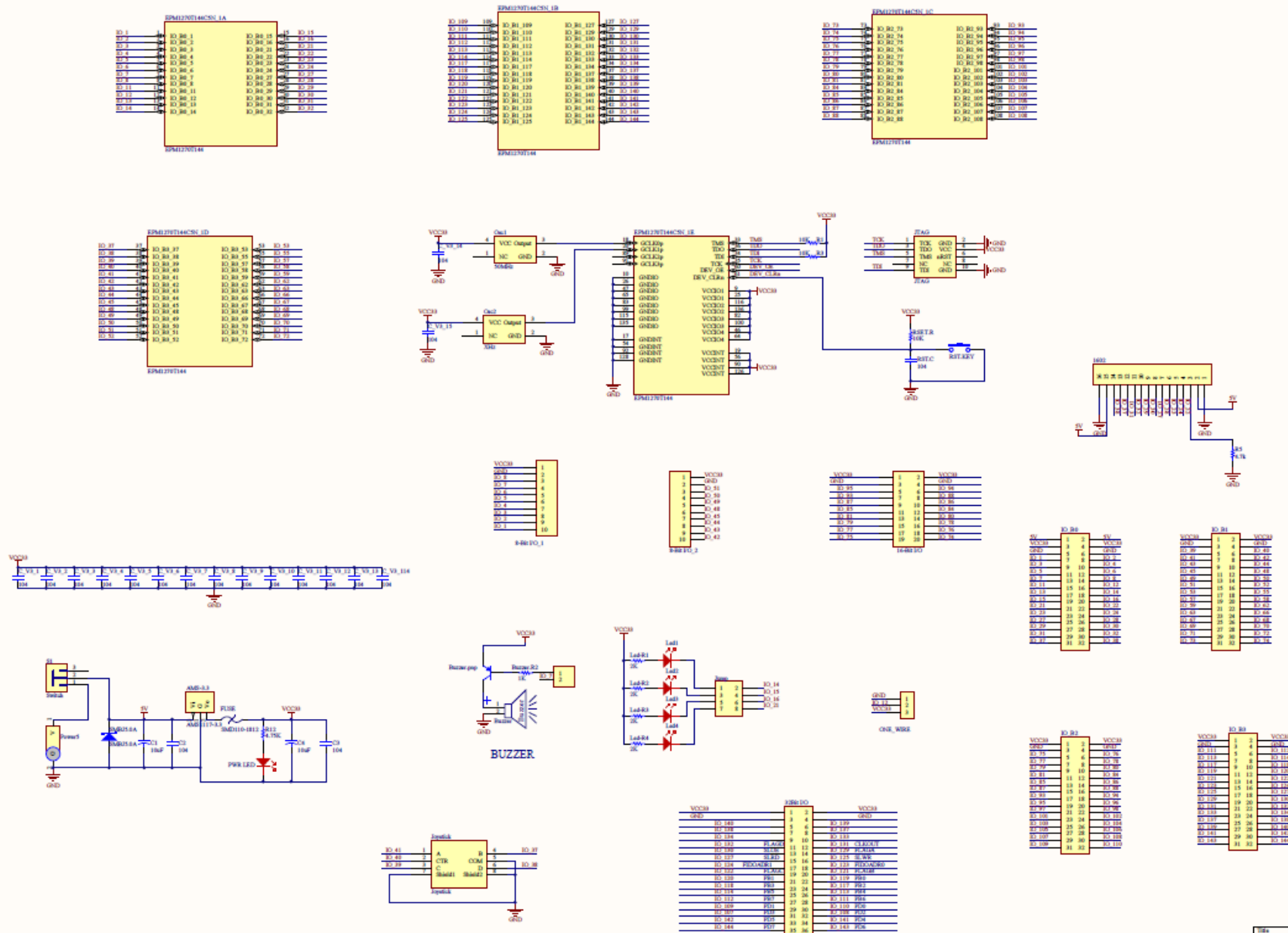
# РОЗРОБКА БАГАТОКАНАЛЬНОГО РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ПРИБАДУ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ

- Для розробки багатоканального радіовимірювального приладу контролю температури вибрана плата EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA



Відладочна плата EPM1270

▶ На рис. наведена схема відладочної плати EPM1270 програмованої логічної інтегральної схеми пристрою.

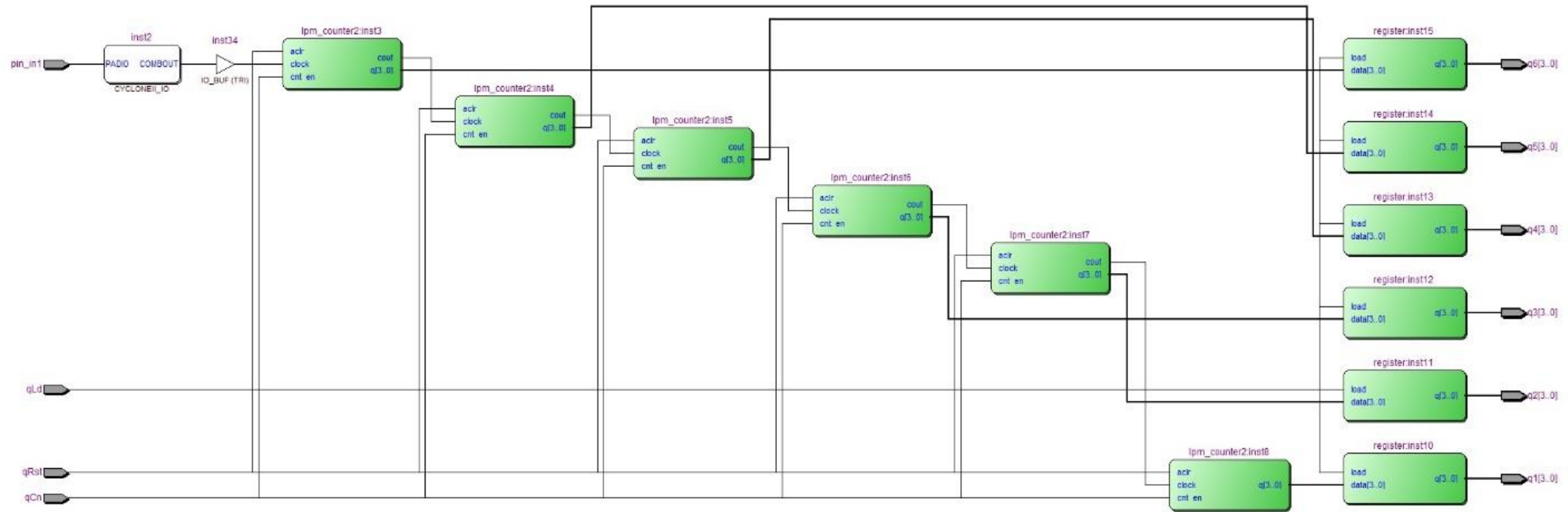


# ► Структурна схема багатоканального радіовимірювального приладу контролю температури

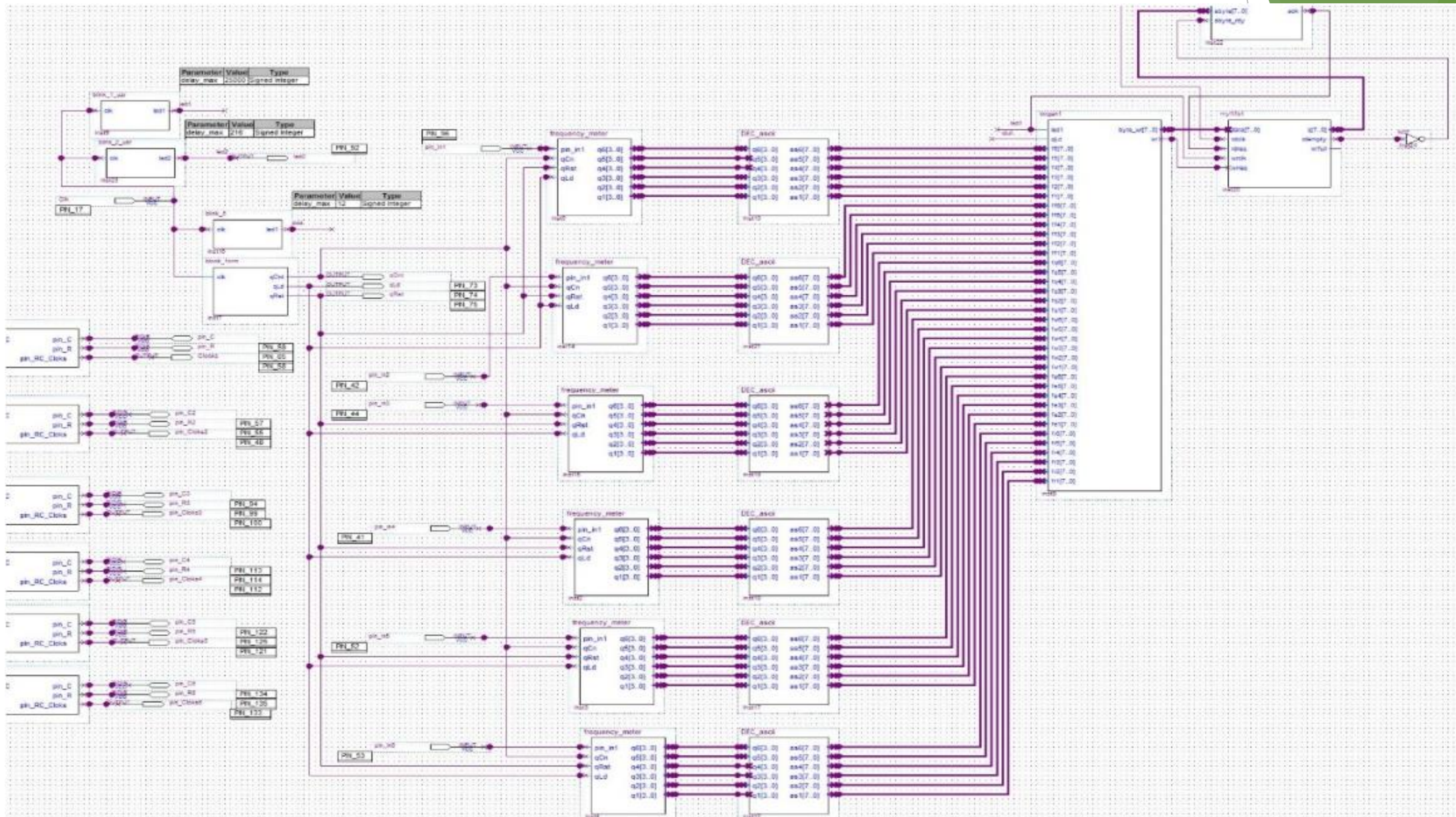




## ► Блок схема частотоміра



► Схема електрично-принципова багатоканального радіовимірювального приладу контролю температури



## ВИСНОВКИ

- ▶ 1. Проведено огляд сучасного стану розвитку методів та засобів перетворювачів температури, розглянуто їх основні переваги та недоліки, а також розглянуто можливість їх застосування для вирішення поставленої задачі. Проаналізувавши існуючі сенсори температури, можна зробити висновок, що створення частотних перетворювачів температури на основі транзисторних структур з від'ємним опором, які реалізують принцип перетворення “ температура – частота” є перспективним напрямком досліджень
- ▶ 2. В ході виконання дипломної роботи було досліджено радіовимірювальні перетворювачі температури на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Головною властивістю такої структури являється зміна реактивного та активного опорів в залежності від напруг керування та живлення і зміни температури. Завдяки цій властивості побудовано перетворювач, який являє собою генератор, частота якого керується температурою. В даному випадку частота регулювалась напругою керування, яка утворювалась за допомогою подільника напруги. В подільник напруги входив первинний перетворювач температури.
- ▶ 3. У дипломній роботі розроблено математичні моделі частотного перетворювача температури на основі нелінійних еквівалентних схем, що дозволило отримати вольт-амперні характеристики, функції перетворення і рівняння чутливості розроблених пристроїв.
- ▶ 4. Розроблено багатоканальну систему контролю температури на основі ПЛІС з використанням радіовимірювальних сенсорів з частотним виходом на основі транзисторної структури з від'ємним опором.