



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет радіотехніки, зв'язку та приладобудування

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Керівник к.т.н., проф. каф. РТ
А.О. Семенов

Розробив студент гр. РТ-14м
Я.О. Осадчук

Вінниця ВНТУ 2015

Розробка чутливих перетворювачів тиску з високими метрологічними характеристиками та вихідним частотним сигналом, який характеризується можливістю перетворення в цифровий код зі значною простотою та наявністю мінімальної похибки, виконаних на основі стандартної групової інтегральної технології та сумісних з цифровими системами обробки інформації, є актуальним питанням в галузі створення первинних вимірювальних перетворювачів механічних величин.

Одним із шляхів розв'язання даного питання є розробка частотних перетворювачів тиску на основі використання тензореактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором.

Метою роботи є покращення метрологічних показників, зокрема, чутливості та завадостійкості, радіовимірювальних сенсорів тиску технологічно сумісних з мікроелектронною технологічною базою за рахунок перетворення електричного сигналу в частотний.

Об'єктом дослідження є процес перетворення тиску у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних сенсорів тиску з покращеними метрологічними показниками.

Предмет дослідження - характеристики радіовимірювальних сенсорів тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються такі *задачі*:

- проаналізувати існуючі перетворювачі тиску та обґрунтувати переваги частотних перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором по відношенню до існуючих;

- розробити математичні моделі частотних перетворювачів тиску на основі біполярних та МДН-транзисторних структур з врахуванням впливу тиску на чутливі елементи та дослідити їх характеристики;

- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних параметрів та характеристик розроблених математичних моделей частотних перетворювачів на основі транзисторних структур від тиску та дослідити їх властивості в широкому діапазоні частот;

- розробити мікропроцесорну систему контролю тиску та температури з використанням розроблених економічних частотних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним опором.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні наступних результатів:

1. Вперше запропоновано метод використання двоколекторних та двостокових тензочувливих транзисторів в радіовимірювальних перетворювачах тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, що працюють по принципу “тиск-частота”.

2. Вперше розроблені математичні моделі тензочувливих біполярних та МДН-транзисторів, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховані залежності електричних параметрів та характеристик транзисторів від тиску, що обумовило розробку автогенераторних вимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур.

3. Вперше розроблені математичні моделі частотних мікроелектронних перетворювачів тиску, в яких на відміну від існуючих, врахований вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювачів на основі біполярних та МДН-транзисторних структур з від'ємним опором, що дало змогу отримати функції перетворення тиску у частоту і рівняння чутливості перетворювачів.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ СЕНСОРІВ ТИСКУ

На сьогоднішній день сенсори тиску займають перше місце по їх застосуванню у промисловості. Об'єм їх випуску складає 49% в порівнянні з усіма іншими сенсорами. Конструкції існуючих сенсорів тиску є аналоговими, тобто вихідними параметрами є напруга або струм. Цей тип сенсорів має ряд недоліків які полягають у наступному: малий вихідний сигнал, що потребує обов'язкового підсилення при подальшій обробці. Мала завадостійкість, що приводить до невисокої точності і низької чутливості, необхідність АЦП.

Для усунення цих недоліків було запропоновано використовувати в якості інформативного параметру частоту, що забезпечить високу завадо стійкість і точність вимірювання, а також потужний сигнал, відсутність АЦП і можливість передачі сигналу на відстань.

3. РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Вдосконалення систем комп'ютеризованого автоматичного контролю і керування різними об'єктами і процесами багато в чому визначається досягненнями в області радіовимірювальних перетворювачів. Проблема створення системи уніфікованих твердотільних перетворювачів з високими метрологічними характеристиками і вихідним сигналом, перетвореним у форму коду з незначними похибками дуже актуальна. Одним із закономірних шляхів її вирішення можна по праву вважати використання реактивних властивостей напівпровідникових структур для побудови частотних первинних вимірювальних перетворювачів різних фізичних величин, зокрема тиску.

3.1 Сенсор тиску з частотним виходом на основі біполярного тензочутливого транзистора

Мікроелектронні перетворювачі механічних величин визначають точність і надійність систем моніторингу процесів, безпеки експлуатації ядерних, теплових, хімічних установок, літальних апаратів, морських об'єктів і т.д.

Схема частотного перетворювача тиску представлена на рис. 3.1. Схема радіовимірювального перетворювача тиску містить біполярний і МДН транзистори, причому емітер біполярного транзистора з'єднаний з витком МДН транзистора. Тензочутливим елементом слугує біполярний транзистор.

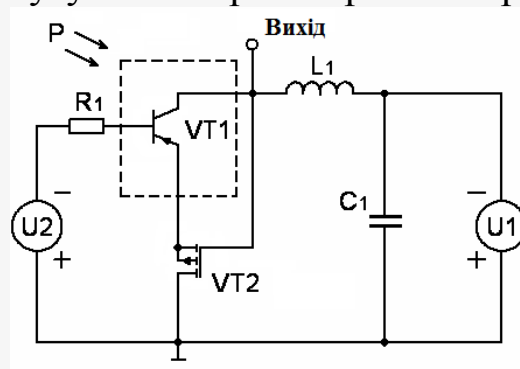


Рисунок 3.1 – Схема перетворювача тиску на основі біполярно-польової транзисторної структури

Генератор електричних коливань створюється на основі структури транзисторів з від'ємним опором. Наявність диференціального від'ємного опору дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі. Коливальний контур пристрою утворений на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового транзистора VT2 і колектора біполярного транзистора VT1. Однією з основних характеристик перетворювача є залежність його функції перетворення. Функція перетворення описується виразом

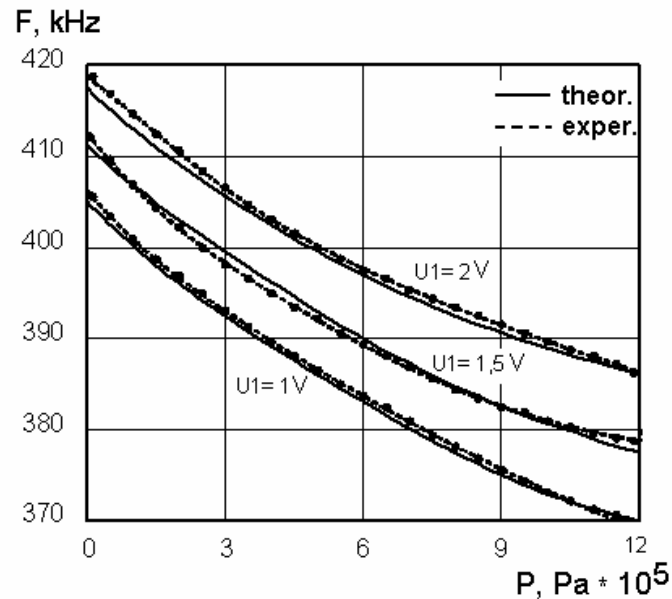
$$F = \frac{1}{2\pi |R_g^-(P)| C_{EKV}(P)} \left[\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (3.1)$$

де $R_g^{(-)}(P)$ – динамічний диференціальний від'ємний опір генератора; $C_{EKV}(P)$ – еквівалентна ємність перетворювача; L – індуктивність коливального контуру.

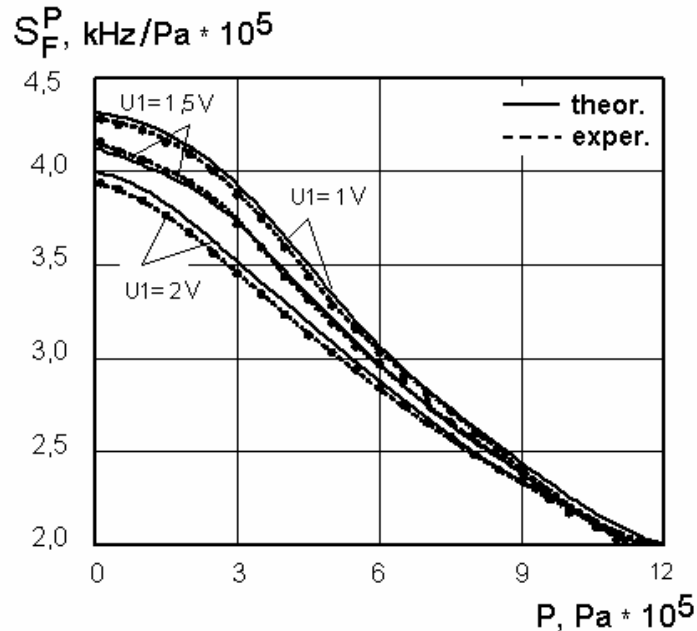
Чутливість перетворювача тиску визначається на основі виразу (3.1) і описується виразом

$$S_F^P = \frac{\frac{R_g(P)C_{EKV}(P)\frac{dR_g(P)}{dP} + R_g^2(P)\frac{dC_{EKV}(P)}{dP}}{L}}{4\pi R_g(P)C_{EKV}(P)\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{EKV}(P)}{L} - 1}} - \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{EKV}(P)}{L} - 1}\frac{dR_g(P)}{dP}}{2\pi R_g^2(P)C_{EKV}(P)} - \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P)C_{EKV}(P)}{L} - 1}\frac{dC_{EKV}(P)}{dP}}{2\pi R_g(P)C_{EKV}^2(P)}. \quad (3.2)$$

Графік функції перетворення представлений на рис.3.2 (а), графік чутливості на рис.3.2 (б). Як видно з цього рисунку, чутливість перетворювача змінюється від 4,25 кГц / Па · 10⁵ до 2,0 кГц / Па · 10⁵ в діапазоні від 0 до 12 · 10⁵ Па.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску (а), залежність чутливості перетворювача від зміни тиску (б)

Як видно з графіка, найбільша чутливість приладу лежить у діапазоні від $0,1 \text{ Па} \cdot 10^5$ до $3 \text{ Па} \cdot 10^5$ і складає $4,25 \dots 3,5 \text{ кГц} / \text{Па} \cdot 10^5$. Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень складає $\pm 3,5\%$.

3.2 Радіовимірювальний мікроелектронний перетворювач тиску на основі двохстокового МДН тензотранзистора

Транзистори зі структурою МДН широко застосовуються в мікроелектроніці завдяки своїм перевагам: мають добрі електричні характеристики, підвищену надійність, відсутність додаткової ізоляції.

Розроблено радіовимірювальний мікроелектронний перетворювач тиску. Схема перетворювача складається з двохстокового МДН тензотранзистора та двозатворного МДН транзистора. Активна складова повного опору на електродах стік-стік транзисторів VT1 і VT2 має від'ємне значення, а реактивна складова має ємнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності до електродів стік-стік транзисторів VT1 і VT2 дозволяє створити генератор електричних коливань, частота генерації якого залежить від зміни тиску.

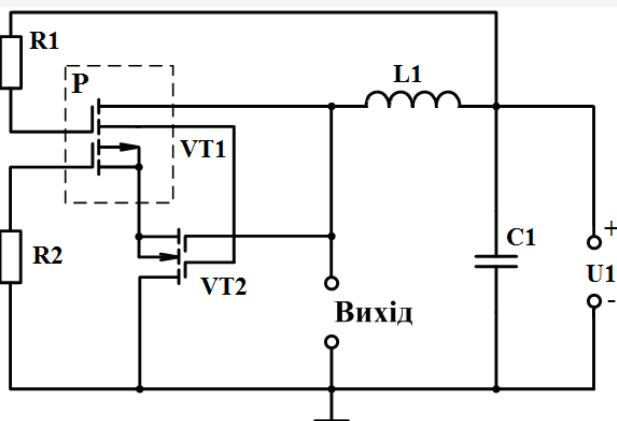


Рисунок 3.3 – Схема радіовимірювального мікроелектронного перетворювача тиску

У даному перетворювачі в якості чутливого елемента використано двостоковий тензочутливий МДН транзистор, який розміщений на кремнійовій мембрані. Двостоковий МДН тензотранзистор розташовується на згині профільованої кремнієвої мембрани, що перетворює рівномірно розподілене по поверхні мембрани навантаження в одноосьову пружну деформацію розтягнення (стиску) її центральної частини в кристалографічному напрямку $\langle 110 \rangle$. З чутливим елементом на основі двостокового тензочутливого МДН транзистора було проведено експериментальні дослідження, що дали можливість отримати залежність частоти генерацій перетворювача від зміни тиску.

Функція перетворення, тобто залежність частоти генерації від зміни тиску, визначається на основі нелінійної еквівалентної схеми радіовимірального перетворювача. Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{\sqrt{2} \sqrt{\frac{A_1 - \sqrt{A_1^2 + 4L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}{L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}}{4\pi}, \quad (3.3)$$

де $A_1 = R_{DS}^2(P) C_{GD}(P) C_{GS}(P) + R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) - L_1 C_{GD}(P)$,

L_1 – зовнішня пасивна індуктивність; C_{GD} – ємність затвор-стік тензочутливого транзистора VT1; C_{GS} – ємність затвор-витік тензочутливого транзистора VT1; R_{DS} – опір витік-стік тензочутливого транзистора VT1; P – тиск.

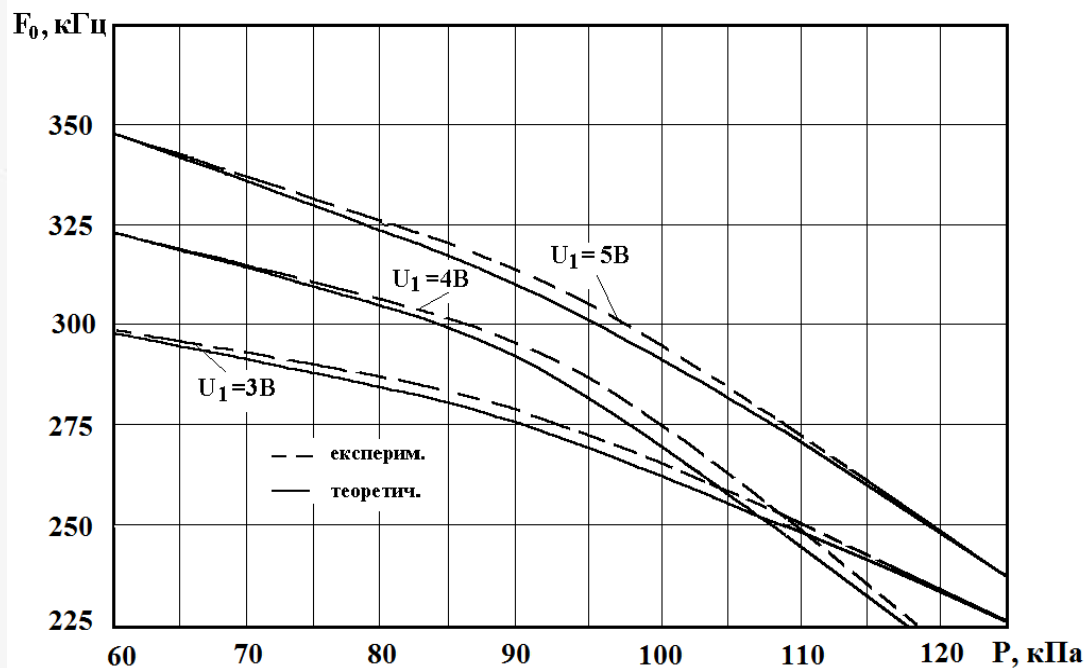


Рисунок 3.4 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску

Чутливість перетворювача на частоті 300 кГц при напрузі живлення 5 В складає 2,1 кГц/кПа.

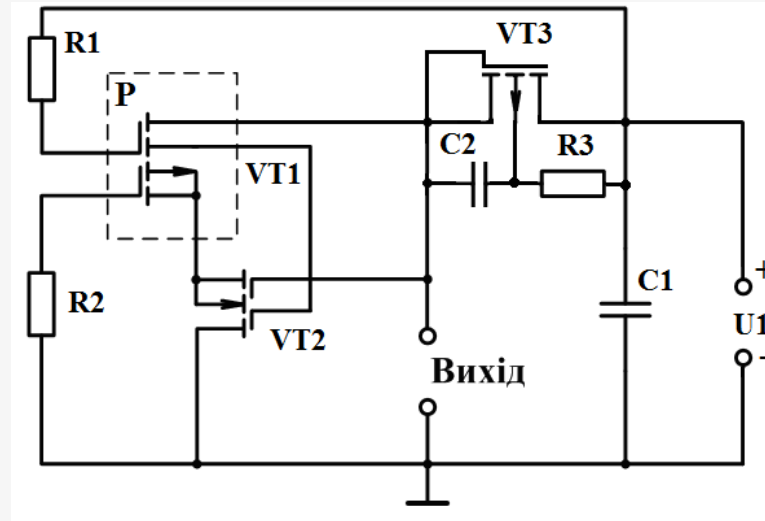


Рисунок 3.5 – Схема частотного мікроелектронного перетворювача тиску

$$F_0 = \frac{\sqrt{2} \sqrt{A_1 - \sqrt{A_1^2 + 4L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}}{4\pi L_{EKV} C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}, \quad (3.4)$$

де

$$A_1 = R_{DS}^2(P) C_{GD}(P) C_{GS}(P) + R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) - L_{EKV} C_{GD}(P)$$

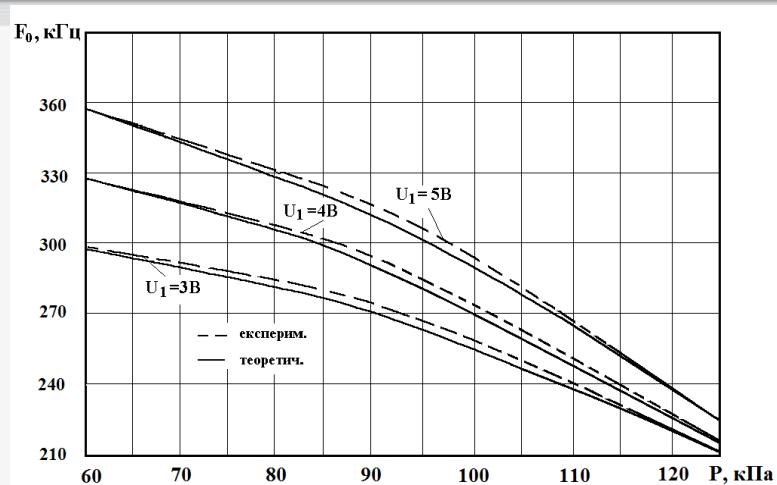


Рисунок 3.6 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації від зміни тиску

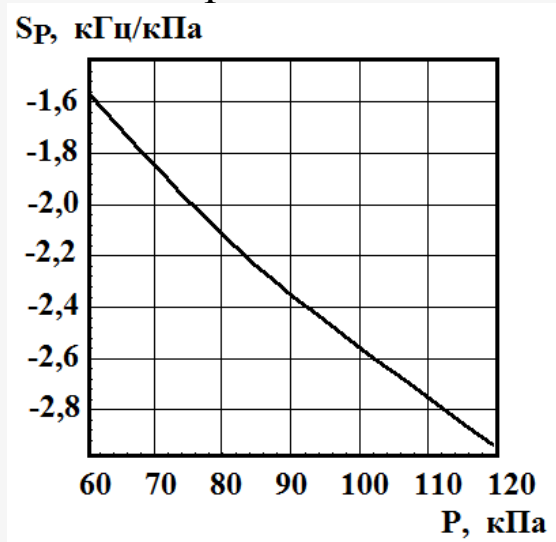


Рисунок 3.7 – Залежність чутливості від тиску

4 РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТИСКУ

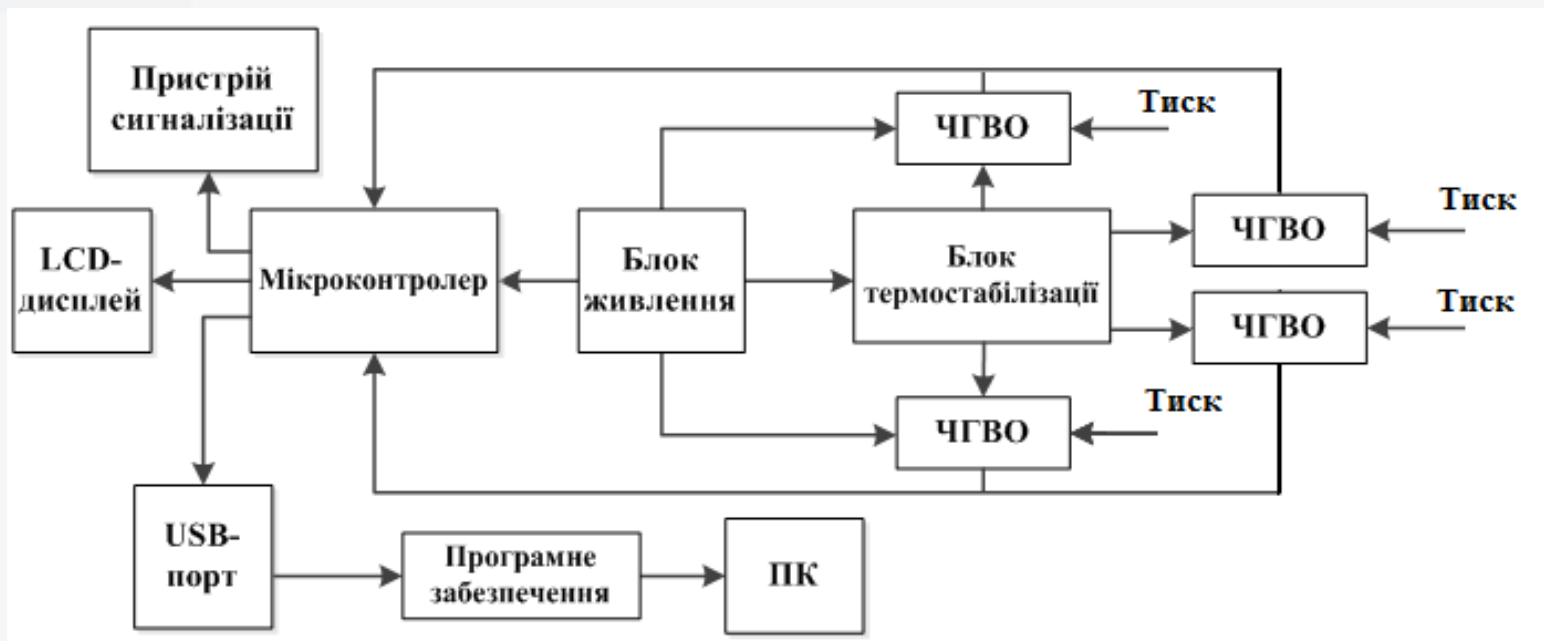


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи для вимірювання та контролю тиску

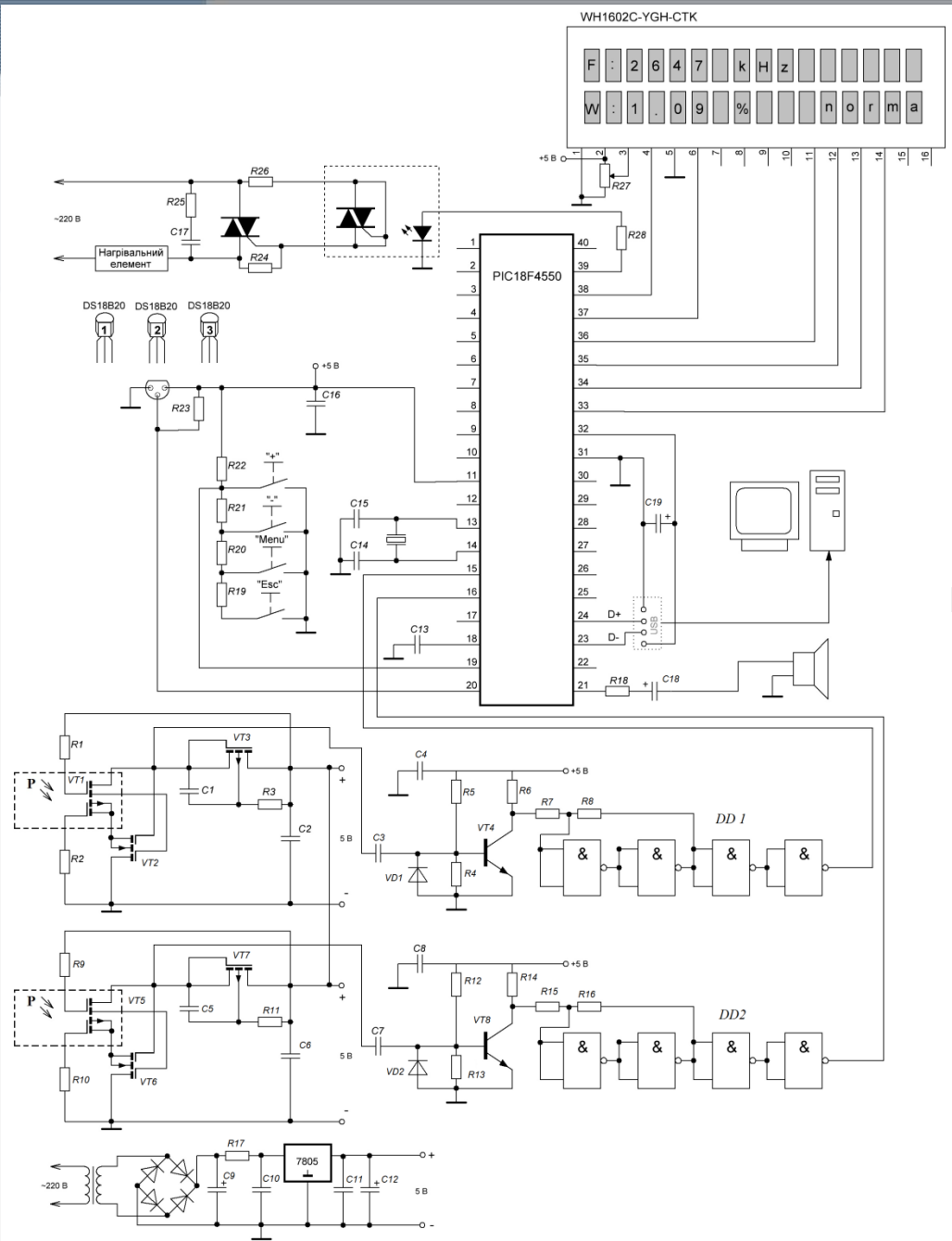


Рисунок 4.2 – Принципова схема системи вимірювання та контролю тиску

ВИСНОВКИ

1. Використання генеруючого принципу реалізації електричної схеми радіовимірювального перетворювача тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором дозволяє одержувати в якості інформативного параметра частоту, що виключає застосування аналого-цифрових перетворювачів з вхідними підсилювачами для суміщення цих напівпровідникових перетворювачів з цифровими пристроями обробки інформації, підвищує чутливість перетворювача, елементно спрощує електричну схему індикації деформаційних ефектів.
2. В результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази, які використовуються для визначення функції перетворення та чутливості мікроелектронних частотних перетворювачів тиску на основі біполярних та польових транзисторних структур з від'ємним опором.
3. Проведені експериментальні дослідження, які показали, що чутливість частотного перетворювача тиску на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором складає 0,5 – 3,0 кГц/кПа в діапазоні тиску 60 кПа – 125 кПа. Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель перетворювача тиску на основі тензочутливих біполярних та МДН транзисторних структур описує поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 3,5\%$.

По результатах наукових досліджень опубліковано у 37 наукових працях. Серед них 7 статей у науково-фахових журналах, 1 стаття в журналі SCOPUS, 11 статей у науково-технічних журналах та збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано 12 патентів на корисну модель України.

Доповідь закінчена, дякую за увагу.