

УДК: 621.382: 681.586.776

## В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; О. В. Осадчук, д. т. н., проф.; С. В. Барабан РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТЕМПЕРАТУРИ

У статті представлено й описано радіовимірювальний перетворювач температури на основі транзисторної структури з від'ємним опором, виконано комп'ютерний експеримент роботи схеми пристрою, визначено функцію перетворення й функцію чутливості радіовимірювального перетворювача температури, проведено експериментальні дослідження роботи цього пристрою температури.

**Ключові слова:** радіовимірювальний перетворювач температури, терморезистор, автогенератор, вольт-амперна характеристика, функція перетворення, від'ємний опір, вимірювання температури.

### Вступ

Важливою різновидом вимірювальних перетворювачів є сенсори температури, оскільки багато процесів, в тому числі і в повсякденному житті, регулюються температурою.

За оцінками вітчизняних і закордонних спеціалістів, технічні вимірювання температури складають відповідно 40 – 50 % від загальної кількості усіх вимірювань [1]. Зокрема, в Україні температурні та теплофізичні вимірювання є одними з найпоширеніших і становлять 30 % усього обсягу вимірювань [2]. Це зумовлено потужним промисловим і науково-технічним потенціалом країни з розвитком переважно таких галузей, як: металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка, хімічна промисловість тощо, ефективна робота яких значною мірою залежить від точності вимірювань температури та теплофізичних характеристик. Тому важливими завданнями сучасного приладобудування та сучасної вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання температури на різних виробництвах, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності чинників, які супроводжують вимірювальний процес.

Ця стаття присвячена створенню та дослідженню радіовимірювального перетворювача температури, дія якого ґрунтується на функціональній залежності імпедансу напівпровідникових приладів від однієї з найбільш поширених неелектричних величин – температури, що представляє теоретичний і практичний інтерес, а тому дозволяє вважати актуальною.

### Схема пристрою вимірювання температури

Схема радіовимірювального перетворювача температури складається з р-п-р-біполярного транзистора і двозатворного п-канального МДН-транзистора, живлення яких здійснюють джерела постійної напруги  $U_1$  і  $U_2$ , пасивної індуктивності  $L$ , конденсатора  $C$  і чутливого елемента – терморезистора  $TR$  (рис. 1).

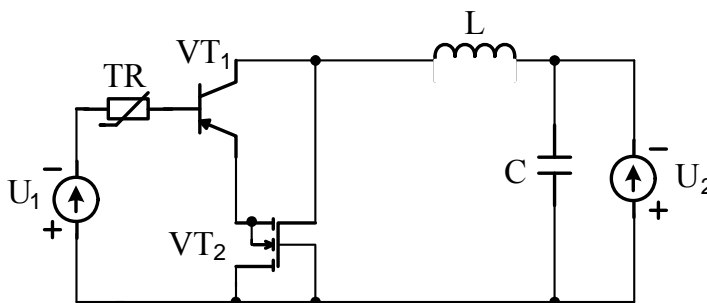


Рис. 1. Електрична схема радіовимірювального перетворювача температури

Радіовимірювальний перетворювач температури працює таким чином. У початковий момент часу температура не діє на термочутливий елемент TR. Підвищенням напруги управляючих джерел  $U_1$  і  $U_2$  до величини, коли на електродах колектор – стік біполярного транзистора  $VT_1$  і польового транзистора  $VT_2$  виникає від’ємний опір, який призводить до виникнення електричних коливань у контурі, утвореному послідовним увімкненням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор – стік транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$  та індуктивним опором пасивної індуктивності L. Конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через керуюче джерело напруги  $U_2$ . Під час наступної дії температури на термочутливий опір TR змінюється його опір, що призводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах колектор – стік транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$ , а це, у свою чергу, призводить до зміни резонансної частоти коливального контуру.

### Моделювання радіовимірювального перетворювача температури

Для моделювання цього пристрою скористаємося пакетом програм Orcad Family Release 9.2. В якості біполярного транзистора візьмемо транзистор марки BC857, а в якості польового транзистора – BF998. У процесі моделювання перетворювача температури стало зрозумілим, що для утворення від’ємного опору в транзисторній структурі  $VT_1$ - $VT_2$  (рис. 1) необхідно використати діляник напруги, який ми й під’єднали в коло першого затвора МДН-транзистора  $VT_2$ . На рис. 3 представлено вікно програмного середовища Orcad Family Release 9.2 зі схемою досліджуваного пристрою.

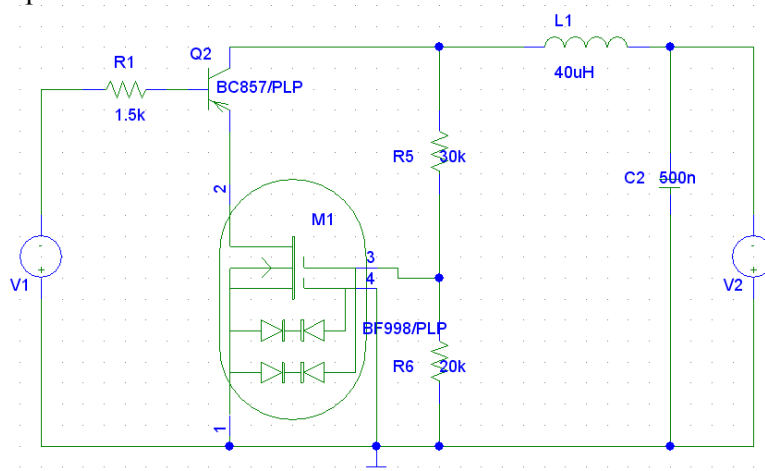


Рис. 3. Схема перетворювача температури, складена в Schematics

На рис. 4 представлено сімейство вольт-амперних характеристик досліджуваного пристрою, отриманих внаслідок моделювання в Orcad Family Release 9.2. Знизу до верху на рис. 4 ВАХ змінюються залежно від прикладеної напруги керування  $V1$ : нижня характеристика знята при  $V1=1,5$  В, далі напруга керування збільшувалась на  $0,5$  В до верхньої характеристики, яка була знята при  $V1=3,5$  В.

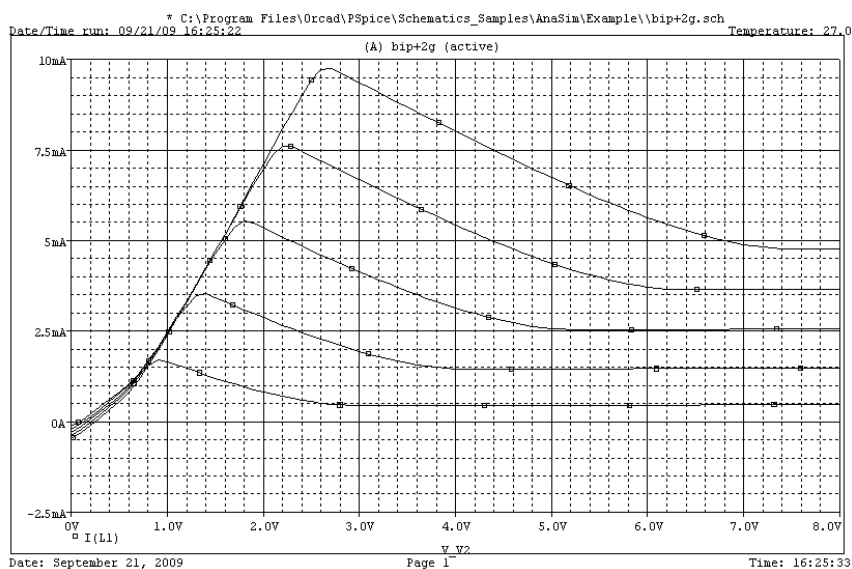


Рис. 4. ВАХ перетворювача температури при різних значеннях напруги керування

На рис. 5 представлено залежність зміни вихідного струму з часом досліджуваного перетворювача температури, отриману в програмному середовищі PSpice.

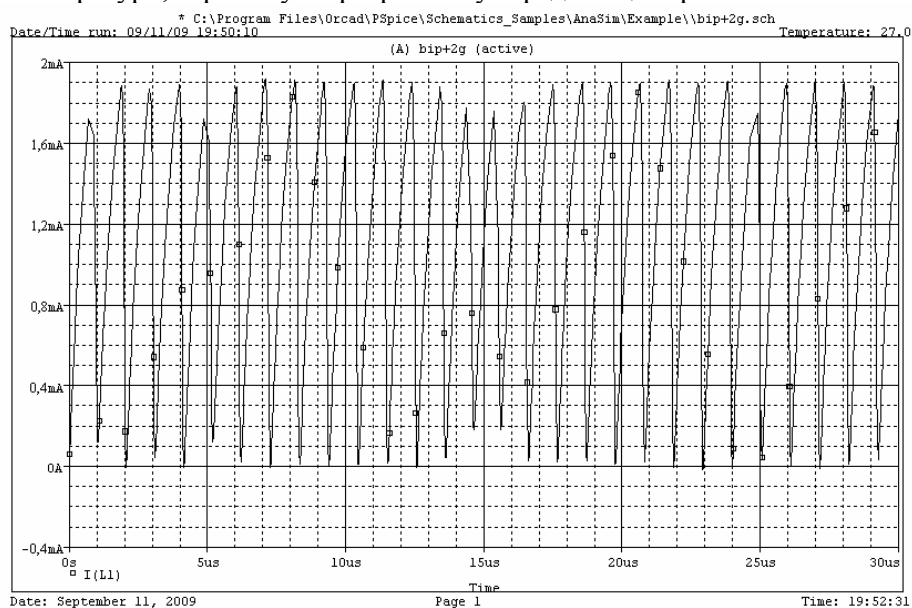


Рис. 5. Залежність зміни вихідного струму з часом перетворювача температури, отримана в PSpice

Отже, моделювання радіовимірювального перетворювача температури (рис. 1) в OrCAD Family Release 9.2 дозволило можливість створення на практиці цього пристрою, а завдяки проведеному моделюванню, стало зрозумілим, яку елементну базу краще використовувати.

#### Визначення функції перетворення радіовимірювального перетворювача температури

Для моделювання радіовимірювального перетворювача температури скористаємося методом контурних струмів. При проведенні досліджень властивостей цього перетворювача необхідно визначити повний опір на електродах колектор-стік (рис. 1). Повний опір  $Z$ , активна частина якого має негативне значення, а реактивна – ємнісний характер, визначається з перетвореної еквівалентної схеми пристрою, яку подано на рис. 6.

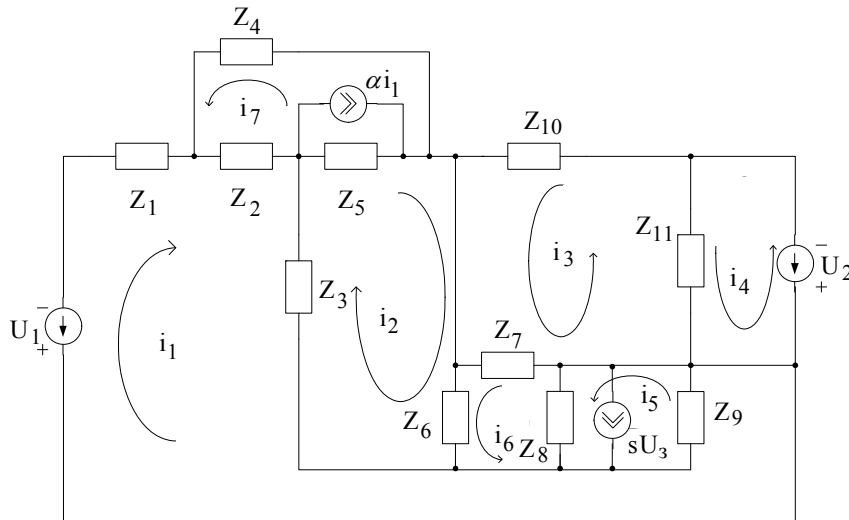


Рис. 6. Перетворена еквівалентна схема перетворювача температури

Згідно з вибраними напрямками контурних струмів система рівнянь Кірхгофа має вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_9) \cdot i_1 + Z_2 \cdot i_7 - Z_3 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_5 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_3 + Z_5 + Z_6) \cdot i_2 - Z_3 \cdot i_1 - Z_5 \cdot \alpha \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_7 + Z_6 \cdot i_6, \\ 0 = (Z_7 + Z_{10} + Z_{11}) \cdot i_3 - Z_7 \cdot i_6 - Z_{11} \cdot i_4, \\ U_2 = Z_{11} \cdot i_4 - Z_{11} \cdot i_3, \\ 0 = (Z_8 + Z_9) \cdot i_5 - Z_8 \cdot i_6 - Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2 + Z_9 \cdot i_1, \\ 0 = (Z_6 + Z_7 + Z_8) \cdot i_6 + Z_6 \cdot i_2 - Z_7 \cdot i_3 - Z_8 \cdot i_5 + Z_8 \cdot s \cdot Z_6 \cdot i_2, \\ 0 = (Z_2 + Z_4 + Z_5) \cdot i_7 + Z_2 \cdot i_1 + Z_5 \cdot i_2 - Z_5 \cdot \alpha \cdot i_1, \end{cases} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_{TR}, Z_2 = R_b, Z_3 = \frac{R_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2} - j \frac{R_e^2 \omega C_e}{1 + (\omega C_e R_e)^2}, Z_4 = \frac{1}{j\omega C_k}, Z_5 = R_k, \\ Z_6 &= \frac{R_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2} - j \frac{R_{gs}^2 \omega C_{gs}}{1 + (\omega C_{gs} R_{gs})^2}, Z_7 = \frac{1}{j\omega C_{gd}}, Z_8 = R_{ds}, Z_9 = \frac{1}{j\omega C_{ds}}, \\ Z_{10} &= j\omega L_1, Z_{11} = \frac{1}{j\omega C_1}, \alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \left( \frac{f}{f_0} \right)^2}. \end{aligned}$$

$\alpha$  – комплексне значення коефіцієнта передачі по струму,  $s$  – крутизна польового транзистора.

Розв'язання системи рівнянь (1) виконується методом Гаусса з частковим вибором головного елемента на персональному комп'ютері. Значення параметрів еквівалентної схеми (рис. 6), необхідних для розрахунків, отримано з робіт [3, 4].

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від температури. Це можна зробити, розв'язавши систему рівнянь Кірхгофа, складену для змінного струму на основі еквівалентної схеми (рис. 6). Розв'язання системи рівнянь (1) дозволяє отримати величину повного опору на електродах колектор – стік перетворювача. Під час розділу повного опору на дійсну й уявну складові нескладно визначити еквівалентну ємність коливального контуру, яка залежить від температури. Функція перетворення в цьому випадку має вигляд:

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{R_{\text{екв}}(T) \cdot C_{\text{екв}}(T)} \sqrt{\frac{R_{\text{екв}}^2(T) \cdot C_{\text{екв}}(T)}{L} - 1} \quad (2)$$

Чутливість радіовимірювального перетворювача температури визначається за формулою:

$$S_{P_{\text{випр}}}^{F_0} = \frac{T}{F_0} \cdot \frac{dF_0}{dT} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{T}{C_{\text{екв}}(T)} \cdot \frac{dC_{\text{екв}}(T)}{dT} \right] \quad (3)$$

На рис. 7 подано теоретичні залежності функції перетворення структури з від'ємним опором на основі біполярного й польового транзисторів, термочутливим елементом якої є терморезистор.

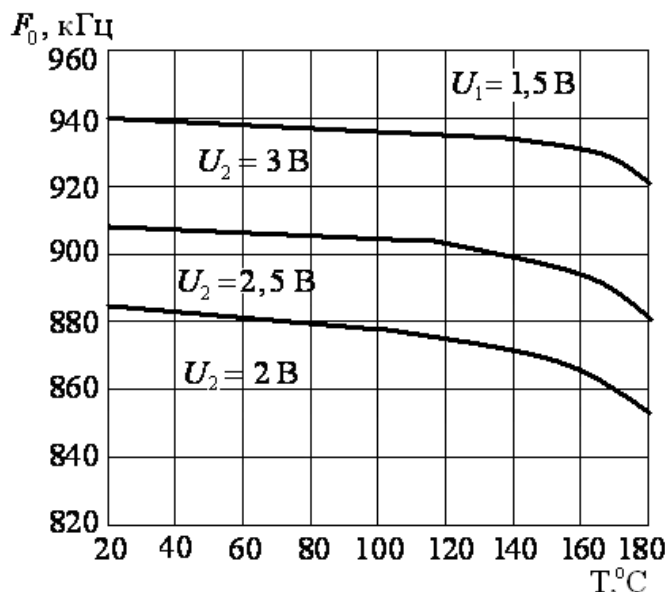


Рис. 7. Теоретична залежність частоти генерації від температури

### Експериментальні дослідження

Під час проведення експериментальних досліджень було використано вітчизняні терморезистори ММТ-1, МКТ-12 і терморезистор фірми Siemens (номіналом 1,5 кОм). Замість МДН-транзистора BF 998 було використано вітчизняний двозатворний n-канальний польовий транзистор марки КП 327АІ, що дозволило відмовитися від використання дільника напруги R5, R6 (рис. 3).

Експериментальну установку для дослідження ВАХ перетворювача подано на рис. 8. Під час проведення експерименту використовувалися джерела постійної напруги (ДПН) типу ВИП009, Б5-43, міліамперметр типу УТ70В, вольтметри типу В7-35, значення параметрів схеми:  $R_T=1,5$  кОм, опір індуктивності  $L$  складав 7 Ом,  $C_1=470$  нФ.

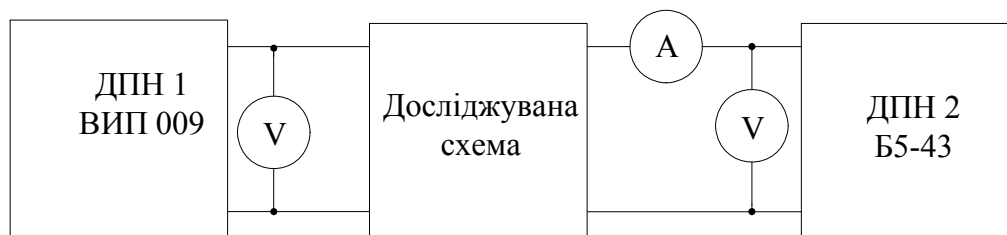


Рис. 8. Блок-схема вимірювальної установки для дослідження ВАХ перетворювача

На рис. 9 подано експериментальні ВАХ частотного перетворювача температури на Наукові праці ВНТУ, 2010, № 1

основі БіМОН структури з ВО (BC 557B та КП 327АИ).

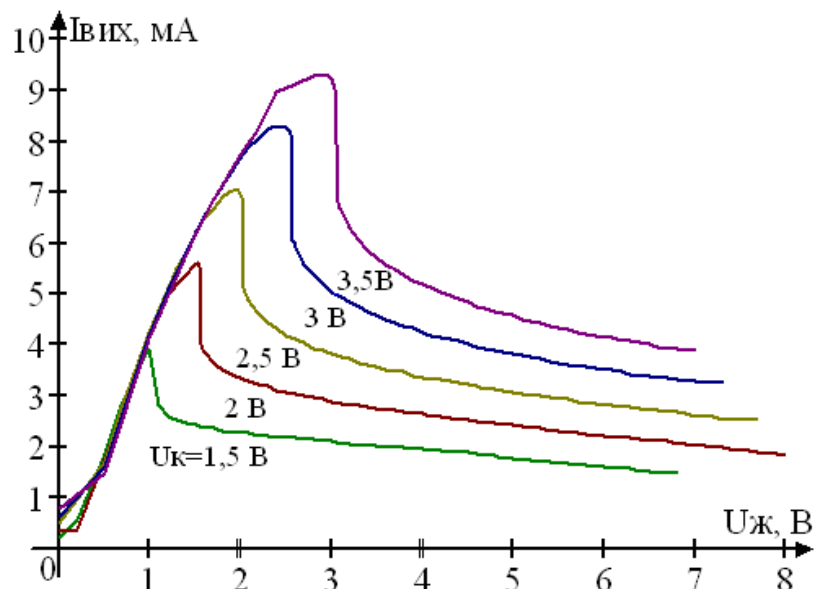


Рис. 9. Експериментальні ВАХ частотного перетворювача температури на основі транзисторів BC 557B та КП 327АИ

Експериментальна установка для дослідження частоти генерації перетворювача від температури подана на рис. 10. Під час проведення експерименту використовувалися джерела постійної напруги (ДПН) типу ВИП009, Б5-43, міліамперметр типу УТ70В, вольтметри типу В7-35, частотомір електроннолічильний ЧЗ-35, осцилограф С1-93, значення параметрів схеми:  $R1=1,5$  кОм, індуктивність  $L=100$  мкГн,  $C1=450$  нФ. Чутливий елемент досліджуваної схеми закріплювався в спеціально виготовлену контактну рамку й розміщувався в печі. Вимірювання температури проводилося за допомогою переносного пірометра типу «Смотрич-4ПМ1».

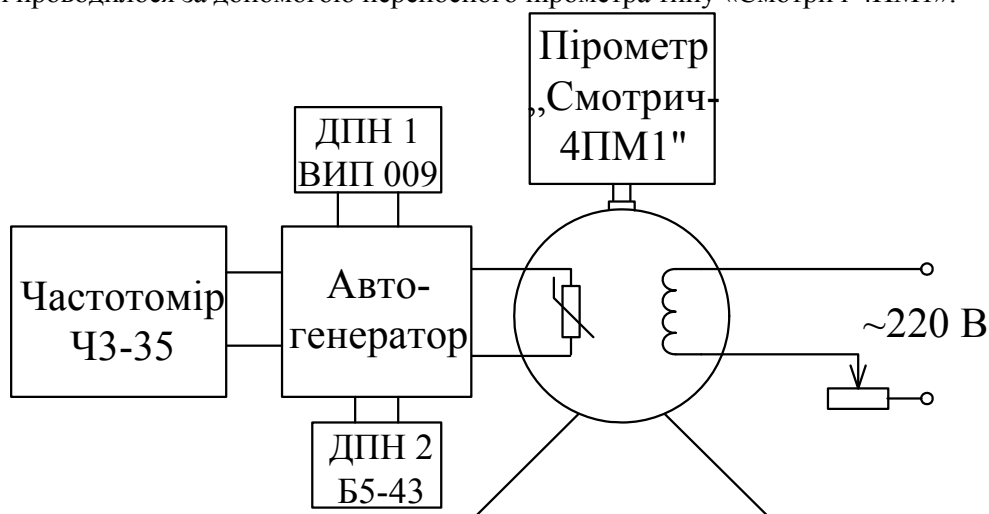


Рис. 10. Блок-схема вимірювальної установки для дослідження залежності частоти генерації від температури

На рис. 11, 12 подано експериментальні залежності частоти генерації від напруги живлення й напруги керування відповідно.

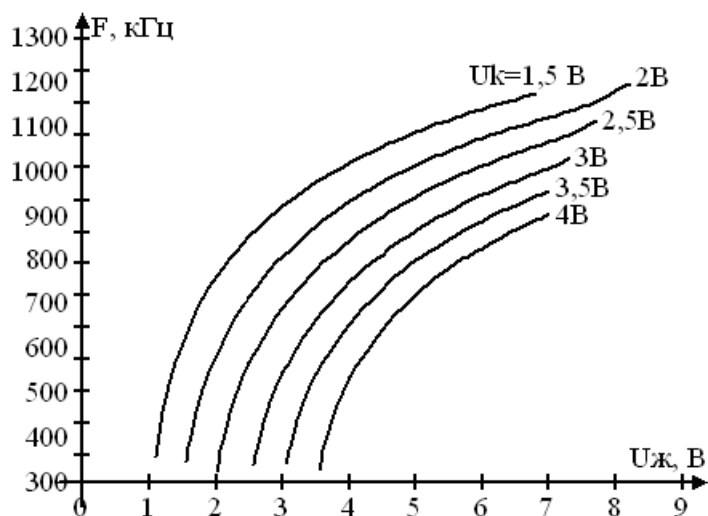


Рис. 11. Експериментальна залежність частоти генерації перетворювача температури від напруги живлення

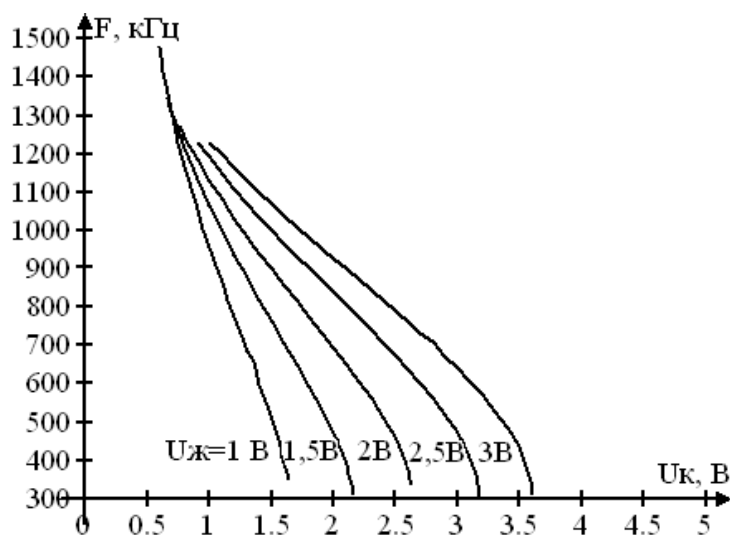


Рис. 12. Залежність частоти генерації перетворювача температури від напруги керування

Вибір робочої точки перетворювача здійснювався на основі отриманих характеристик залежності частоти генерації пристрою від напруги живлення й напруги керування (рис. 11, 12).

На рис. 13 – 15 подано, експериментальні залежності частоти генерації при різних режимах живлення від температури для різних терморезисторів. Як видно з рисунка, оптимальним діапазоном робочих температур є інтервал від  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $160^{\circ}\text{C}$ .

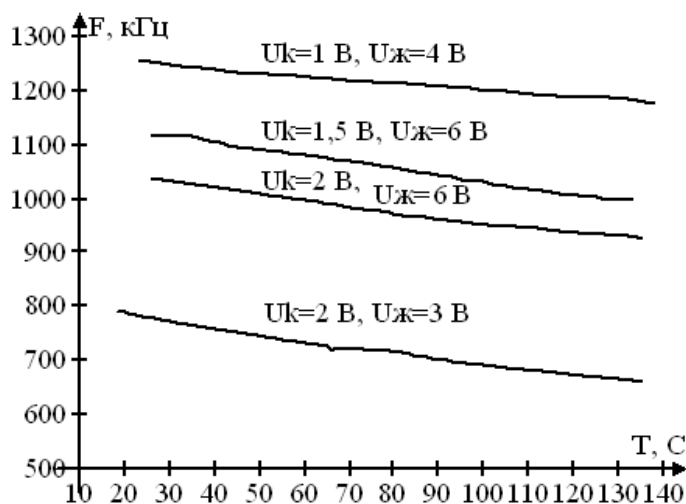


Рис. 13. Експериментальна залежність частоти генерації від температури для перетворювача на основі терморезистора ММТ-1 (1,5 кОм)

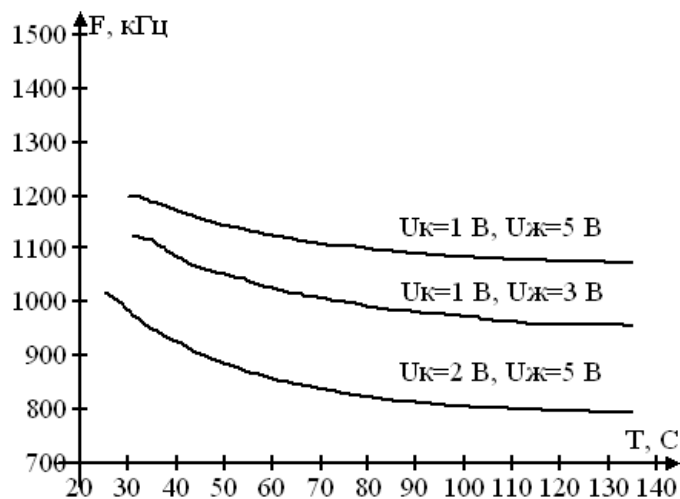


Рис. 14. Експериментальна залежність частоти генерації від температури для перетворювача на основі терморезистора МКТ-12 (1,5 кОм)

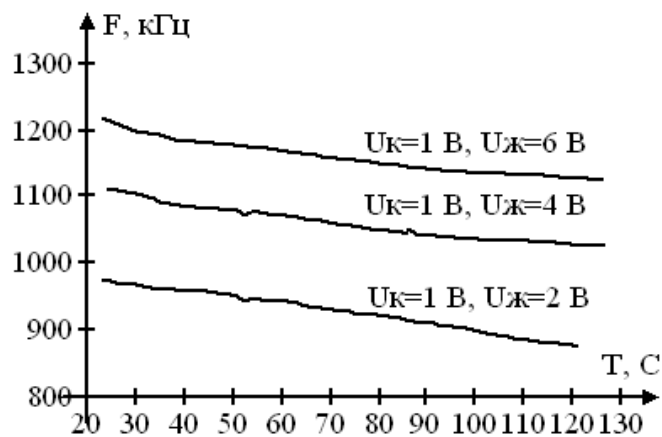


Рис. 15. Експериментальна залежність частоти генерації від температури для перетворювача на основі терморезистора компанії Siemens (1,5 кОм)

Отже, як видно з графіків залежностей, отриманих в результаті експериментальних



досліджень, для мікроелектронного перетворювача температури в якості чутливого елемента найкраще використовувати вітчизняний терморезистор ММТ-1.

### Висновки

У цій статті виконано моделювання радіовимірювального перетворювача температури в пакеті програм Orcad Family Release 9.2. Методом контурних струмів, за законами Кірхгофа, отримано функцію перетворення й функцію чутливості пристрою. Проведено експериментальні дослідження, внаслідок чого отримано сімейство ВАХ, частотні залежності від режиму живлення, залежність частоти генерації перетворювача від температури для різних чутливих елементів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виглеб Т. Датчики / Т. Виглеб. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
2. Гоц Н. Є. Сучасні проблеми інформаційної підтримки оптичної пірометрії / Н. Є. Гоц // Актуальні проблеми економіки. – 2006. – №10. – С. 45 – 51.
3. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором / О. В. Осадчук. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000. – 303 с. – ISBN 966-7199-99-1.
4. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В. Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.

**Осадчук Володимир Степанович** – д. т. н., професор, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

**Осадчук Олександр Володимирович** – д. т. н., професор, завідувач кафедрою радіотехніки, e-mail: osadchuk69@mail.ru.

**Барабан Сергій Володимирович** – аспірант кафедри радіотехніки, e-mail: akakieva@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.