

**О. В. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.; М. В. Деундяк, асп.; В. П. Деундяк**

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИБАДУ З ОПТИКО-ЧАСТОТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ**

*Проведено математичний аналіз оптико-частотного перетворювача для радіовимірювального приладу на основі біполярної транзисторної структури. Розроблено функцію перетворення для оптико-частотного перетворювача.*

### **Вступ**

Останнім часом проблема створення системи уніфікованих оптико-частотних перетворювачів з вихідним сигналом, який можна перетворити у форму коду з незначними похибками є досить актуальною [1]. Оскільки існуючі перетворювачі мають низку недоліків (низька точність, мала швидкодія, складність проектування) [2, 3], то у цій роботі створюється та досліджується оптико-частотний перетворювач, дія якого ґрунтується на функціональній залежності імпедансу напівпровідникових приладів від оптичного випромінювання, що становить теоретичний та практичний інтерес. Використання приладів з від'ємним опором дозволяє підвищити чутливість і стабільність пристрою.

Як чутливий елемент використовується піроелектричний елемент. Розрахунок схеми виконано методом змінних станів. Обмеження моделі, побудованої цим методом, пов'язане з тим, що будується еквівалентна схема, яка є лінійною системою, тому нелінійні ефекти реальних схем не можуть бути змодельовані шляхом складання еквівалентних схем [4]. Еквівалентна схема не може абсолютно точно відповідати реальній схемі внаслідок значної кількості розподілених паразитних ефектів в останній. Проте це і не потрібно оскільки еквівалентна схема складається з достатньою для конкретного завдання деталізацією.

*Метою роботи є отримання математичної моделі оптико-частотного перетворювача на основі транзисторних структур з від'ємним опором для підвищення чутливості, точності та стабільності.*

Задачі:

1. Отримати аналітичні вирази для повного опору оптико-частотних перетворювачів.
2. Визначити аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості.
3. Отримати графіки залежностей активної і реактивної складової повного комплексного опору від частоти, частоти генерації та чутливості від температури.

### **Математична модель радіовимірювального оптико-частотного перетворювача**

Вирішити проблему дистанційного вимірювання температури дозволяє прилад, показаний на рис. 1 [5]. Його принцип дії базується на дії зміни температури, що приймається піроелектричним температурним давачем (інфрачервоний діапазон), таким чином змінюється вихідна напруга на давачеві, що приводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів та викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

В час, коли зміна температури відсутня, вимірювання не відбуваються. В момент часу, коли на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів виникає від'ємний опір, який зумовлює виникнення електричних коливальних в контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів VT1, VT2 та пасивною індуктивністю L1). При подальшій дії зміни температури, яка приймається давачем, змінюється вихідна напруга на ньому, яка змінює ємнісну складову повного опору на електродах колектор-колектор пари біполярних транзисторів, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Враховуючи схему заміщення піроелектричного чутливого елемента ВК1 [6], перетворимо схему рис. 1.

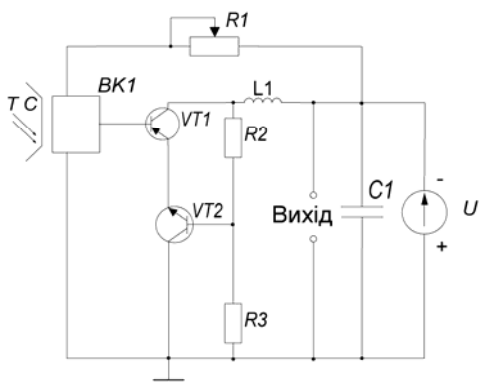


Рис. 1. Електрична схема оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури: BK1 – піроелектричний чутливий елемент; VT1, VT2 – транзистори;  $R_1, R_2, R_3$  – резистори;  $L_1$  – котушка індуктивності;  $C_1$  – конденсатор;  $U$  – напруга живлення

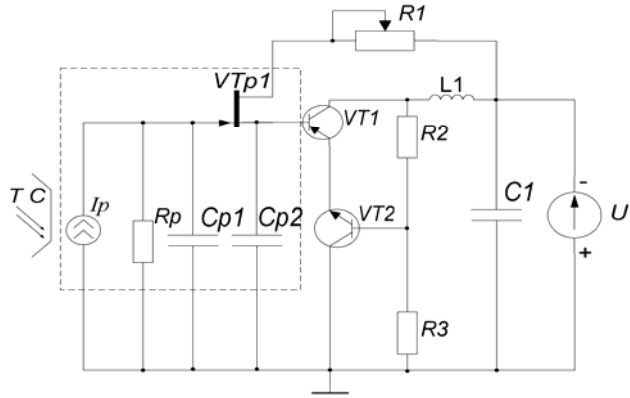


Рис. 2. Електрична схема оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури з урахуванням еквівалентної схеми заміщення піроелектричного давача:  $I_p$  – струм піроелектричного чутливого елемента (ПЧЕ); VTp1 – транзистор ПЧЕ;  $R_p$  – резистор ПЧЕ;  $C_{p1}, C_{p2}$  – конденсатори ПЧЕ

Для дослідження роботи оптико-частотного перетворювача в динамічному режимі потрібно отримати залежність активної та реактивної складової комплексного опору кола колектор-колектор структури. Для цього зобразимо схему пристрою, враховуючи еквівалентні схеми транзисторів, отримавши схему на рис. 3.

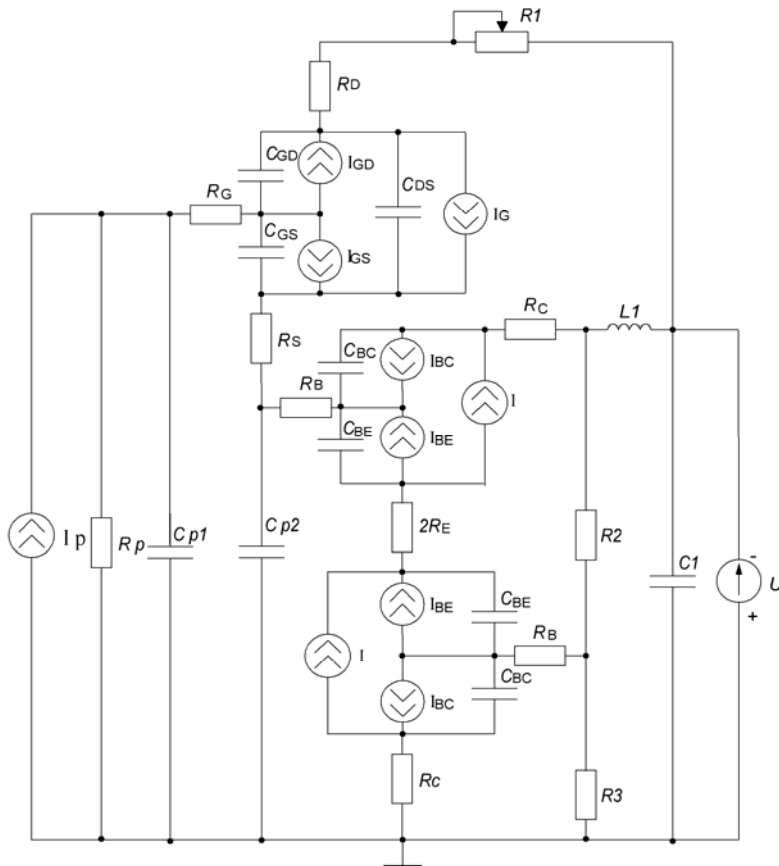


Рис. 3. Еквівалентна схема оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури (по змінному струму):  $R_E, R_B, R_C, R_D, R_G, R_S$  – резистори, що вказують опір емітера, бази, колектора, стоку, затвору і витoku відповідно;  $C_{BE}, C_{BC}, C_{GD}, C_{GS}$  – конденсатори, що вказують ємність переходів база-емітер, база-колектор, затвор-стік, затвор-витік;  $I, I_{BE}, I_{BC}, I_{GD}, I_{GS}$  – струми база-емітер, база-колектор, затвор-стік, затвор-витік

Проведемо математичне моделювання схеми (рис. 3), використовуючи метод змінних станів [6]. Для зручності розрахунків використовуємо спрощену еквівалентну схему оптико-частотного перетворювача на рис. 3.

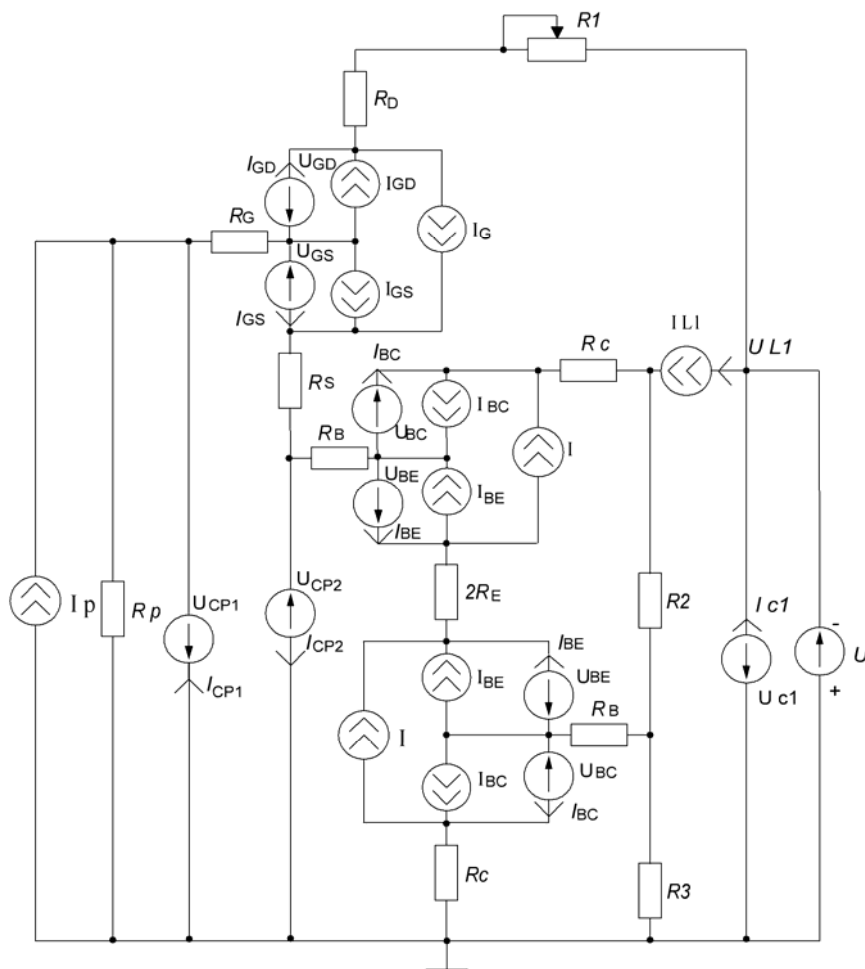


Рис. 4. Перетворена еквівалентна схема оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

На основі методу змінних станів, складемо систему диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{U_L(t) - U(t) + U_{C1}(t)}{R_2}; \quad C_{GD} \frac{dU_{GD}(t)}{dt} = I_G(t) + \frac{1}{R_D + R_1} U_D(t); \\ C_{GS} \frac{dU_{GS}(t)}{dt} = \frac{1}{R_S} U_S(t) - I_G(t); \quad C_{BC} \frac{dU_{BC}(t)}{dt} = I(t) - \frac{1}{R_C} U_C(t); \\ C_{BE} \frac{dU_{BE}(t)}{dt} = \frac{1}{R_E} U_E(t) - I(t); \\ C_1 \frac{dU_{C1}(t)}{dt} = \frac{1}{R_3} U_3(t) + \frac{1}{2R_E} U_E(t) - \frac{1}{R} U(t) - \frac{1}{R_D + R_1} U_D(t); \\ C_{P1} \frac{dU_{P1}(t)}{dt} = - \left( I_P(t) + \frac{1}{R_P} U_P(t) + \frac{1}{R_S} U_S(t) + \frac{1}{R_D + R_1} U_D(t) \right); \\ C_{P2} \frac{dU_{P2}(t)}{dt} = \frac{1}{R_3} U_3(t) + \frac{1}{R_C} U_C(t) + \frac{1}{2R_E} U_E(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $R_1, R_2, R_3, R_P, R_E, R_B, R_C, R_D, R_G, R_S$  — резистори, що вказують опір ПЧЕ, емітера, бази, колектора, стоку, затвору і витоків відповідно;  $C_{P1}, C_{P2}, C_1, C_{BE}, C_{BC}, C_{GD}, C_{GS}$  — конденсатори.

ри, що вказують ємність переходів ПЧЕ, база-емітер, база-колектор, затвор-стік, затвор-витік;  $I = \frac{I_{BE} - I_{BC}}{Q}$ ,  $I_P, I_{BE}, I_{BC}, I_{GD}, I_{GS}, I_L$  — струми ПЧЕ, база-емітер, база-колектор, затвор-стік, затвор-витік, котушки індуктивності;  $L = L_1$  — котушка індуктивності;  $U, U_{BE}, U_{BC}, U_{GD}, U_{GS}, U_{P1}, U_{P2}, U_{C1}$  — напруга живлення та напруга на відповідних конденсаторах.

Струми база-емітер  $I_{BE}$  і база-колектор  $I_{BC}$  описуються виразами [7]

$$I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right); \quad (2)$$

$$I_{BC} = I_S \exp\left(\frac{U_{BC}}{NC \cdot V_t} - 1\right); \quad (3)$$

$$I_S = I_{SS} \exp\left(\frac{U_{jS}}{NS \cdot V_t} - 1\right), \quad (4)$$

де  $Q$  — заряд в базі;  $V_t = kT/q$ ;  $I_{SS}$  — зворотний струм  $p-n$  переходу підкладки;  $U_{BE}$  — напруга база-емітер;  $U_{BC}$  — напруга база-колектор;  $U_{jS}$  — контактна різниця потенціалів переходу колектор-підкладка;  $NE$  — коефіцієнт не ідеальності емітерного переходу;  $NC$  — коефіцієнт не ідеальності колекторного переходу;  $NS$  — коефіцієнт не ідеальності переходу підкладки.

Отримана математична модель є адекватною фізично існуючій схемі, що підтверджується експериментальними даними, які наведено у [7], [8], [9].

Розв'яжемо отриману систему рівнянь у середовищі Maple 6. Система розв'язків матиме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_L(t) = \frac{t(U_L + U + U_1)}{LR_2}; \quad U_{GD}(t) = \frac{t(U_D + I_G R_D + I_G R_1)}{C_{GD}(R_D + R_1)}; \\ U_{GS}(t) = \frac{t(0,5U_S - I_g R_S)}{C_{GS}R_S}; \quad U_{BC}(t) = \frac{t(IR_C - U_C)}{C_{BC}R_C}; \\ U_{BE}(t) = \frac{t(0,5U_E - IR_E)}{C_{BE}R_E}; \\ U_1(t) = \frac{t(0,5U_E R_3 R (R_D + R_1)) + U_3 R_E R (R_D + R_1) - U_D R_3 R_E R - U R_3 R_E (R_1 + R_D)}{C_1 R_3 R_E R (R_D + R_1)}; \\ U_{P1}(t) = \frac{-t(U_P R_S (R_D + R_1) + I_P R_P R_S (R_D + R_1) + U_D R_P R_S + U_S R_P (R_1 + R_D))}{C_P R_P R_S (R_D + R_1)}; \\ U_{P2}(t) = \frac{t(U_3 R_C R_E + U_C R_3 R_E + U_E R_3 R_C)}{C_{P2} R_3 R_C R_E}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Розв'язавши отриману систему рівнянь, визначимо вираз для активної складової повного опору оптико-частотного перетворювача температури, що матиме вигляд:

$$R = \frac{U_1(t)}{U_{P1}(t)} \cdot R_P; \quad (6)$$

$$R = - \frac{C_P R_P^2 R_S \left( 0,5U_E R_3 R + U_3 R_E R - U_D \frac{R_3 R_E R}{(R_D + R_1)} - U R_3 R_E \right)}{C_1 R_3 R_E R \left( 2U_P R_S + U_D \frac{R_P R_S}{(R_D + R_1)} + U_S R_P \right)}. \quad (7)$$

$$\text{Відомо, що [4]} \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (8)$$

Враховуючи, що оптико-частотний перетворювач є послідовним коливальним контуром, котрий можна представити з'єднанням еквівалентної ємності і котушки індуктивності, реактивний опір визначиться [4]

$$X = X_L - X_C \Rightarrow X_C = X_L - X = X_L - \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (9)$$

Побудуємо графічні залежності відповідно до формул (7), (9).

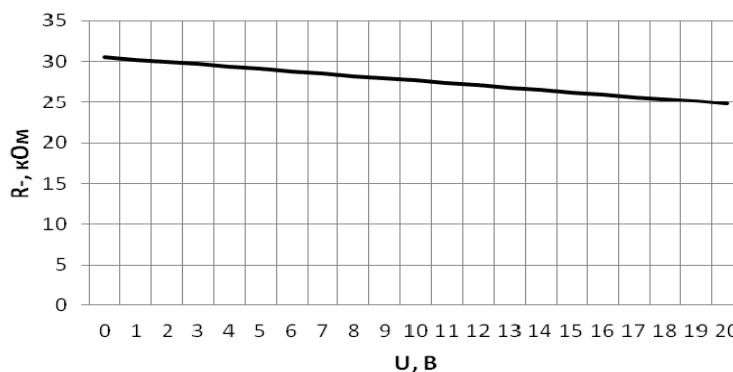


Рис. 5. Теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

З (рис. 5) випливає, що теоретична залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення для оптико-частотного перетворювача на основі структури з біполярної транзисторної пари практично пряма з невеликим спадом при зростанні напруги живлення. Опір змінюється з 30 до 25 кОм зі зміною напруги живлення від 0,5 до 20 В.

З (рис. 6) випливає, що теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для оптико-частотного перетворювача на основі структури з біполярної транзисторної пари має ємнісний характер і набуває значення від – 35 кОм на частотах нижче 1 кГц. На частотах 1 кГц ... 1 МГц реактивна складова близька до 0, тому, що ємнісна та індуктивна складова на цих частотах дуже малі. На частотах вище 1 МГц опір має індуктивний характер, зростаючи набуває значення до 40 кОм.

Функція перетворення описується рівнянням [3]

$$F_0 = \frac{X_C(T)}{2\pi L_1} . \quad (10)$$

На рис. 7 зображено теоретичну залежність частоти генерації від температури для оптико-частотного перетворювача, яка зростає пропорційно збільшенню температури. Частота набуває таких значень: 2...2,5 МГц при температурах 5...60 °С; 2,5...3 МГц при температурах 60...120 °С; 3...3,5 МГц при температурах 120...160 °С; 3,5...4 МГц при температурах 160...200 °С; 4...4,5 МГц при температурах 200...220 °С.

Чутливість визначиться за формулою

$$\frac{dF_0}{dT} = \frac{1}{2\pi L_1} \frac{dX_C(T)}{dT} . \quad (11)$$

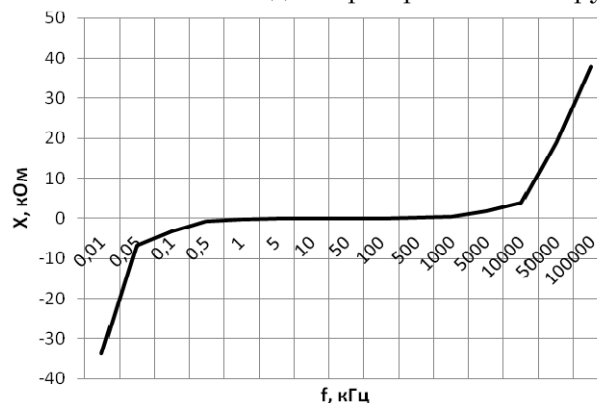


Рис. 6. Теоретична залежність реактивної складової повного комплексного опору від частоти для оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

З рис. 8 випливає, що чутливість пропонованого приладу лежить в межах 5...20 Гц/°С.

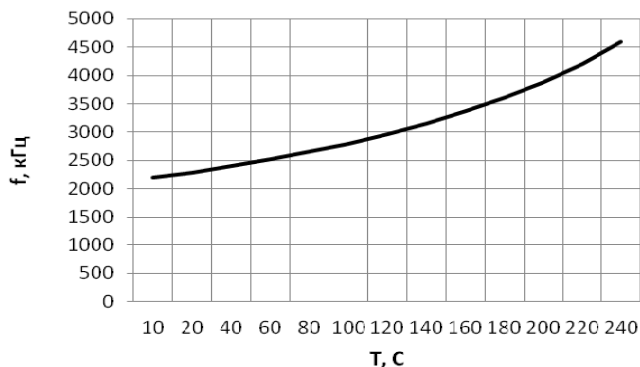


Рис. 7. Теоретична залежність частоти генерації від температури випромінювача для оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

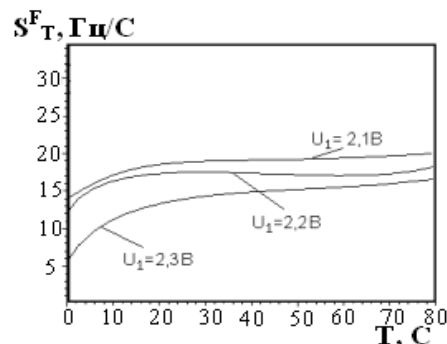


Рис. 8. Теоретична залежність чутливості від температури випромінювача для оптико-частотного перетворювача на основі біполярної транзисторної структури

### Висновки

Отримано математичну модель оптико-частотного перетворювача на основі транзисторних структур з від'ємним опором для підвищення чутливості, точності та стабільності.

1. Отримано аналітичні вирази для повного опору оптико-частотного перетворювача, що дозволяє визначити функцію перетворення. Повний опір має комплексний характер, активна складова набуває від'ємного значення, а реактивна ємнісний та індуктивний характер.

2. Визначено аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості. Отже, в нашому випадку чутливість складає 5 Гц/°С, а у відомих приладів для вимірювання температури 4 мВ, проте краще вимірювати чутливість у Гц/°С, тому що еталонну одиницю вимірювання в Гц зручніше отримувати, ніж у мВ.

3. Отримано графіки залежностей активної і реактивної складової повного комплексного опору від частоти, частоти генерації та чутливості від температури. Ці графіки дозволяють аналізувати роботу пристрою. Наприклад, частота генерації росте зі збільшенням температури випромінювача.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество / Д. В. Сивухин. — М. : Наука, 1977. — 688 с.
2. Поскачей А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 246 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи : учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. — 7-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1978. — 528 с.
4. Матханов П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. : учеб. для электротехн. радиотехн. спец. вузов. / П. Н. Матханов — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 1990. — 400 с.
5. Осадчук В. С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук // Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. — 163 с.
6. Осадчук О. В. Математична модель чутливого елемента у вигляді піроелектрика для радіовимірювального приладу на основі оптико-частотного температурного перетворювача / О. В. Осадчук, В. П. Деундяк, М. В. Деундяк // Вісник Хмельницького національного університету. — 2011. — № 2. — С. 186—192.
7. Оптико-частотний температурний сенсор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, В. П. Деундяк, М. В. Деундяк // Вісник Хмельницького національного університету. — 2009. — № 2. — С. 168—174.
8. Осадчук О. В. Метод змінних станів для створення математичних моделей радіовимірювальних приладів / О. В. Осадчук, М. В. Деундяк // Збірник наукових статей за матеріалами IV-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. — 2011. — С. 387—390.
9. Осадчук В. С. Оптико-частотний температурний сенсор [Електронний ресурс] / О. В. Осадчук, В. П. Деундяк, М. В. Деундяк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2009. — № 3. — Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2009-3/2009-3.htm>.

Рекомендована кафедрою радіотехніки

Стаття надійшла до редакції 10.10.11  
Рекомендована до друку 15.12.11

**Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри, **Деундяк Марина Володимирівна** — аспірант.

Кафедра радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Деундяк Володимир Петрович** — головний інженер НВП «Укртерм», Вінниця