

Надійшла 6.3.2009 р.

УДК 621. 38

О.В. ОСАДЧУК, В.П. ДЕУНДЯК, М.В. ДЕУНДЯК
Вінницький національний технічний університет**ОПТИКО-ЧАСТОТНИЙ ТЕМПЕРАТУРНИЙ СЕНСОР**

В статті розглянуто стан, проблеми і перспективи розвитку вимірювання та контролю температури в різних галузях господарства, науки і техніки. Запропоновано засоби для задоволення цієї потреби, а саме оптико-частотний сенсор для виміру температури, що має високі технічно-експлуатаційні характеристики, що і дозволяє його використання в різних галузях народного господарства.

Вступ

Потреба в швидкому безконтактному вимірюванні та контролюванні температури невпинно зростає. Основними засобами для задоволення цієї потреби є оптико-електронні прилади для виміру температури, що об'єднують широкий клас пристроїв. Саме тому метою проведених досліджень є визначення основних параметрів та характеристик оптико-частотного сенсора для виміру температури.

Важливим різновидом сенсорів є сенсори температури, адже багато процесів регулюється відповідно до значення температури. Використання температурних сенсорів, як правило, ґрунтується на вимірюванні залежності електричного опору від температури, за виключенням сенсорів на основі термопар, де виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна напрузі.

Для виміру температури в даний час використовуються напівпровідникові або мікроелектронні сенсори, що виконані у вигляді мікросхем, інфрачервоні сенсори, термометри опору, термістори, термопари.

Використання досягнень сучасної мікроелектронної технології привело до значних успіхів у створенні різноманітних пристроїв контролю і управління. Проте часто отримання високих метрологічних характеристик апаратури досягається за рахунок підвищення її складності, габаритів, маси і вартості. Для подальшого суттєвого підвищення якості первинних перетворювачів необхідно використовувати нові фізичні явища і пошук нових принципів реалізації пристроїв, які відзначаються багатофункціональністю, малою споживаною потужністю, стабільністю характеристик, високою чутливістю, підвищеною швидкістю і надійністю. Отже, проблемою, що вирішується в даній статті є дослідження нового приладу для вимірювання температури – оптико-частотного температурного сенсора температури, що дозволяє ефективно вирішити завдання дистанційного вимірювання температури.

Дослідження роботи та характеристик оптико-частотного сенсора температури

Принцип дії оптико-частотного температурного сенсора ґрунтується дії зміни температури, що приймається температурним давачем ІРА – Е420S1 фірми Murata (фотоелектричний, інфрачервоний давач), таким чином змінюється вихідна напруга на давачеві, що приводить до зміни ємнісної складової повного опору на електродах емітер-затвор біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів, що викликає зміну резонансної частоти коливального контуру (рис. 1). Пропонований пристрій складається з давача температури та перетворювача напруга-частота.

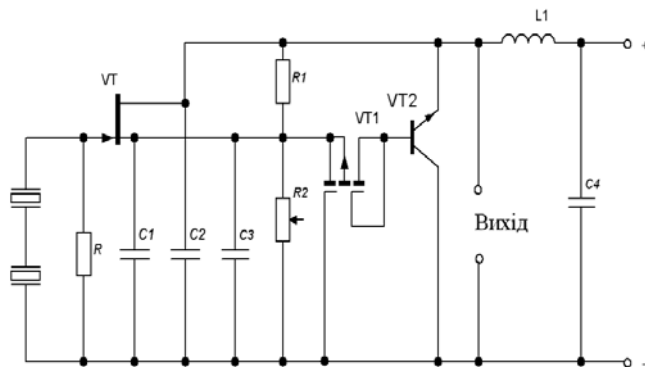


Рис. 1. Електрична схема оптико-частотного температурного сенсора

В момент часу, коли зміна температури відсутня, тоді вимірювання не відбуваються. В момент часу, коли на електродах емітер-затвор біполярного та двозатворного польового метал-діелектрик-напівпровідник (МДН) транзисторів виникає від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі (контур утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах

емітер-затвор біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів VT1, VT2 та пасивною індуктивністю L). При наступній дії зміни температури, яка приймається давачем, змінюється вихідна напруга на ньому, яка змінює ємнісну складову повного опору на електродах емітер-затвор біполярного та двозатворного польового МДН транзисторів, а це, в свою чергу, викликає зміну резонансної частоти коливального контуру.

Ефективно вирішити проблему дистанційного вимірювання температури дозволяє пристрій зображений на рис. 1. Існує потреба в теоретичному і практичному доведенні того, що на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів є від'ємний опір, що відповідає спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики (ВАХ) (рис. 2). Крім того, для вивчення роботи оптико-частотного температурного сенсора в динамічному режимі необхідно отримати залежність активної та реактивної складової комплексного опору електродів колектор-колектор структури. Щоб це здійснити представимо схему пристрою враховуючи еквівалентне схеми транзисторів, отримавши схему на рис. 3.

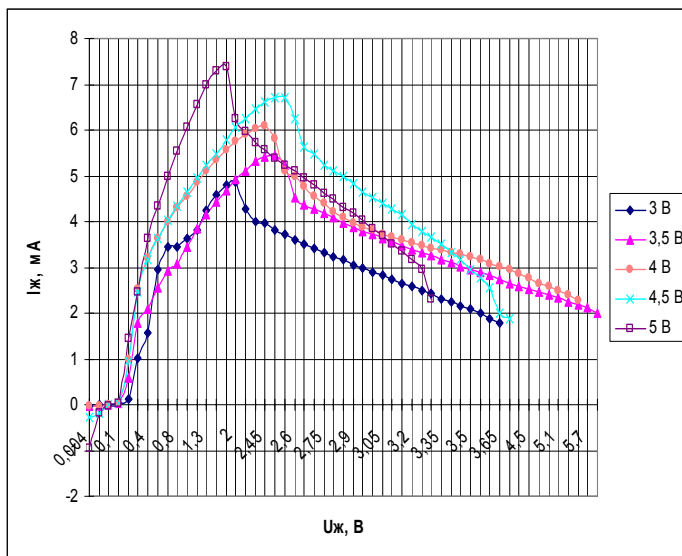


Рис. 2. ВАХ оптико-частотного температурного сенсора

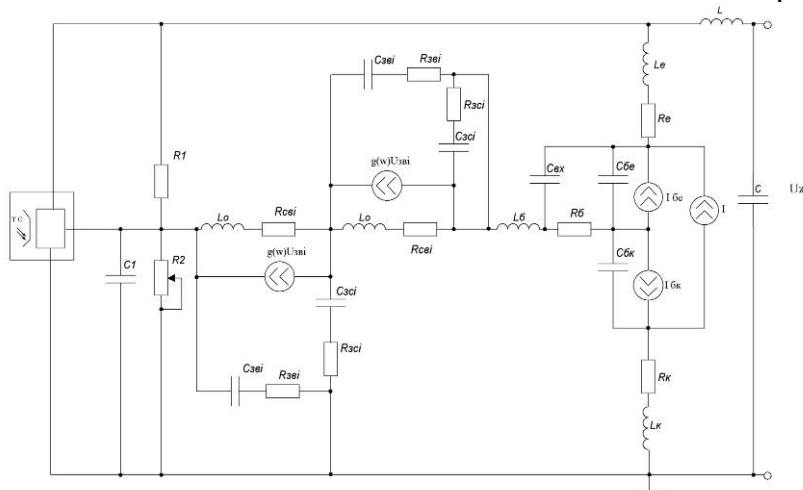


Рис. 3. Еквівалентна схема оптико-частотного температурного сенсора

Для зручності розрахунків спрощену еквівалентну схему оптико-частотного температурного сенсора подано на рис. 4.

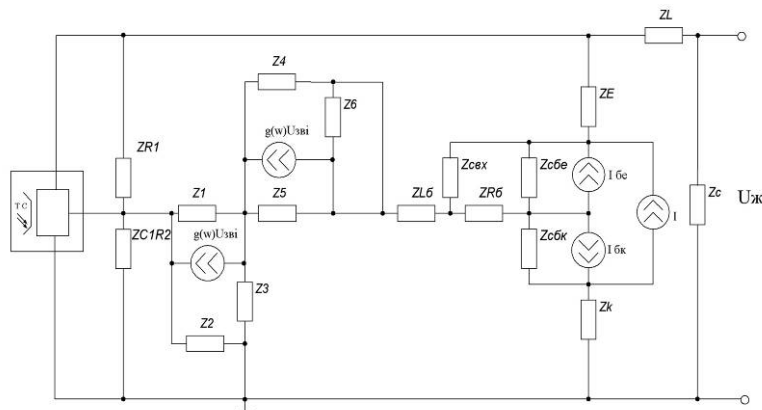


Рис. 4. Спрощена еквівалентна схема оптико-частотного температурного сенсора

Проведемо розрахунок даної математичної моделі на основі методу вузлових потенціалів, склавши і розв'язавши систему рівнянь.

$$\left. \begin{aligned}
 -\frac{U_1}{Z_1} + \frac{U_8}{Z_2} + \frac{U_9}{Z_{C1R2}} + \frac{U_{10}}{Z_{R1}} &= g(\omega)U_{3Bi} \\
 \frac{U_7}{Z_3} + \frac{U_8}{Z_2} &= 0 \\
 \frac{U_6}{Z_K} - \frac{U_7}{Z_3} - \frac{U_8}{Z_2} - \frac{U_9}{Z_{C1R2}} &= 0 \\
 \frac{U_7}{Z_{LB}} - \frac{U_7}{Z_3} - \frac{U_8}{Z_2} &= 0 \\
 \frac{U_1}{Z_1} - \frac{U_7}{Z_{LB}} - \frac{U_7}{Z_3} &= -g(\omega)U_{3Bi} \\
 -\frac{U_1}{Z_{LB}} - \frac{U_3}{Z_{CBX}} + \frac{U_4}{Z_{RB}} &= 0 \\
 \frac{U_2}{Z_E} - \frac{U_3}{Z_{RB}} - \frac{U_3}{Z_{CBB}} &= I - I_{BE} \\
 \frac{U_3}{Z_{CBE}} - \frac{U_4}{Z_{RB}} - \frac{U_5}{Z_{CBK}} &= -I_{BK} - I_{BE} \\
 \frac{U_2}{Z_E} + \frac{U_{10}}{Z_{R1}} &= \frac{U_J}{Z_L} \\
 \frac{U_5}{Z_{CBB}} - \frac{U_6}{Z_K} &= I_{BK} - I,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де $Z_{R1} = R_1; Z_{R2} = R_2; Z_1 = Z_5 = R_{CBi} + j\omega L_0; Z_2 = Z_4 = R_{3Bi} + \frac{-j}{\omega C_{3Bi}};$
 $Z_3 = Z_6 = R_{3Ci} + \frac{-j}{\omega C_{3Ci}}; Z_{C1R2} = \frac{R_2}{1 + j\omega C_1}; Z_{RB} = R_B; Z_{LB} = j\omega L_B; Z_{CBX} = \frac{-j}{\omega C_{BX}};$
 $Z_K = R_K + j\omega L_K; Z_{CBK} = \frac{-j}{\omega C_{BK}}; Z_{CBE} = \frac{-j}{\omega C_{BE}}; Z_E = R_E + j\omega L_E.$

Струми база-емітер I_{BE} і база-колектор I_{BK} описуються виразами:

$$I = \frac{I_{BE} - I_{BK}}{Q}, \quad (2)$$

$$I_{BE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{NE \cdot V_t} - 1\right), \quad (3)$$

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

$$I_S = I_{SS} \exp\left(\frac{U_{jS}}{NS \cdot V_t} - 1\right), \quad (5)$$

де Q – заряд в базі; $V_t = kT/q$; I_{SS} – зворотний струм р-п переходу підкладки; U_{BE} – напруга база-емітер; U_{BK} – 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.

Розв'яжемо отриману систему рівнянь матричним методом. Для чого запишемо вираз основної матриці системи – А, стовбець вільних членів – В і знайдемо стовбці розв'язків системи – Х, відповідно.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{18} & a_{19} & a_{110} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{27} & a_{18} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{36} & -a_{27} & -a_{18} & -a_{19} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{47} & -a_{18} & 0 & 0 \\ -a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{47} & 0 & 0 & 0 \\ a_{61} & 0 & a_{63} & a_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{72} & -(a_{83} + a_{64}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{830} & -a_{64} & a_{85} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{110} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_{85} & -a_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \\ 0 \\ b_7 \\ b_8 \\ b_9 \\ b_{10} \end{pmatrix},$$

де

$$a_{11} = -\frac{1}{Z_1}; a_{18} = \frac{1}{Z_2}; a_{19} = \frac{1}{Z_{C1R2}}; a_{110} = -\frac{1}{Z_{R1}}; a_{27} = \frac{1}{Z_3}; a_{28} = \frac{1}{Z_2}; a_{36} = \frac{1}{Z_K};$$

$$a_{37} = -\frac{1}{Z_3}; a_{38} = -\frac{1}{Z_2}; a_{39} = -\frac{1}{Z_{C1R2}}; a_{47} = \frac{1}{Z_{LB}} - \frac{1}{Z_3}; a_{48} = -\frac{1}{Z_2}; a_{51} = \frac{1}{Z_1};$$

$$a_{57} = \frac{1}{Z_{LB}} - \frac{1}{Z_3}; a_{61} = -\frac{1}{Z_{LB}}; a_{63} = -\frac{1}{Z_{CBX}}; a_{64} = \frac{1}{Z_{RB}}; a_{72} = \frac{1}{Z_E};$$

$$a_{73} = -\frac{1}{Z_{CBB}} - \frac{1}{Z_{RB}};$$

$$a_{83} = \frac{1}{Z_{CBB}}; a_{84} = -\frac{1}{Z_{RB}}; a_{85} = -\frac{1}{Z_{CBB}}; a_{92} = -\frac{1}{Z_E}; a_{910} = -\frac{1}{Z_{R1}}; a_{105} = \frac{1}{Z_{CBB}};$$

$$a_{106} = -\frac{1}{Z_K}; b_1 = g(\omega)U_{3Bi}; b_5 = -g(\omega)U_{3Bi}; b_7 = I - I_{BE}; b_8 = -I_{BK} - I_{BE};$$

$$b_9 = \frac{U_{Ж}}{Z_L}; b_{10} = I_{BK} - I.$$

Таким чином, система розв'язків рівнянь матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} U_1 &= -g(\omega)U_{3Bi} \cdot Z_1 \\ U_2 &= \left(\frac{U_{Ж}}{Z_L} - \frac{U_{10}}{Z_{K1}} \right) \cdot Z_E \\ U_3 &= \frac{Z_{CBB} \cdot Z_{RB}}{(Z_{CBB} + Z_{RB})} \left(\frac{U_{Ж}}{Z_L} + \frac{U_{10}}{Z_{R1}} - I + I_{BE} \right) \\ U_4 &= \left(\frac{U_3}{Z_{CBX}} - g(\omega)U_{3Bi} \frac{Z_1}{Z_{LB}} \right) \cdot Z_{RB} \\ U_5 &= Z_{CBB} \cdot \left(\frac{U_6}{Z_K} - I + I_{BK} \right) \\ U_6 &= Z_K \cdot \frac{U_9}{Z_{C1R1}} \\ U_7 &= 0; U_8 = 0; U_9 = 2g(\omega)U_{3Bi} \cdot Z_{C1R1} - U_{10} \\ U_{10} &= \frac{\left(\frac{U_{Ж}}{Z_L} - I + I_{BE} \right) \left(\frac{Z_{CBB} \cdot Z_{RB}}{Z_{CBB}(Z_{CBB} + Z_{RB})} - \frac{Z_{RB}}{Z_{CBB} + Z_{RB}} \right) - I + I_{BK} - g(\omega)U_{3Bi} \frac{Z_1}{Z_{LB}} + 2g(\omega)U_{3Bi}}{\frac{Z_{RB} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{C1R1} + Z_{R1} \cdot Z_{CBB} \cdot (Z_{CBB} + Z_{RB}) - Z_{C1R1} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{RB}}{Z_{R1} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{C1R1}(Z_{CBB} + Z_{RB})}}, \quad (6) \end{aligned} \right.$$

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

$$Z = \frac{U_{Ж} \cdot (Z_{R1} + Z_{C1R1}) \cdot \frac{Z_{RB} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{C1R1} + Z_{R1} \cdot Z_{CBB} \cdot (Z_{CBB} + Z_{RB}) - Z_{C1R1} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{RB}}{Z_{R1} \cdot Z_{CBB} \cdot Z_{C1R1} (Z_{CBB} + Z_{RB})}}{\left(\frac{U_{Ж}}{Z_L} - I + I_{BE} \right) \left(\frac{Z_{CBB} \cdot Z_{RB}}{Z_{CBB} (Z_{CBB} + Z_{RB})} - \frac{Z_{RB}}{Z_{CBB} + Z_{RB}} \right) - I + I_{BK} - g(\omega) U_{3Bi} \frac{Z_1}{Z_{LB}} + 2g(\omega) U_{3Bi}} \quad (7)$$

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що активна складова повного комплексного опору кола приймає від’ємне значення, що подано на рис. 5. В свою чергу, а реактивна складова повного комплексного опору кола має ємнісний характер (рис. 6).

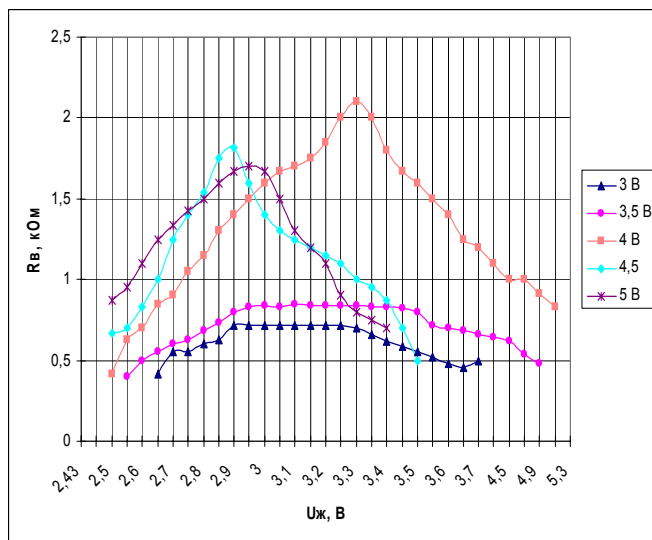


Рис. 5. Експериментальна (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності активної складової повного комплексного опору від напруги живлення

Як видно з графіка рис. 6 експериментальна залежність активної складової повного комплексного опору від напруги живлення має вигляд кривої, що зростає, а потім спадає.

Щодо рис. 6, то він відображає те, що зі збільшенням напруги живлення реактивна складова повного комплексного опору поступово зменшується (приблизно до рівня 1 кОм).

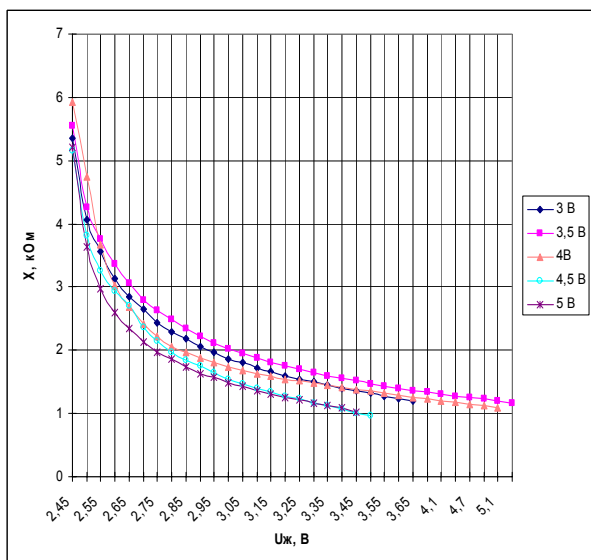


Рис. 6. Експериментальні (при різних напругах керування 3 В; 3,5 В; 4 В; 4,5 В; 5 В) залежності реактивної складової повного комплексного опору від напруги живлення

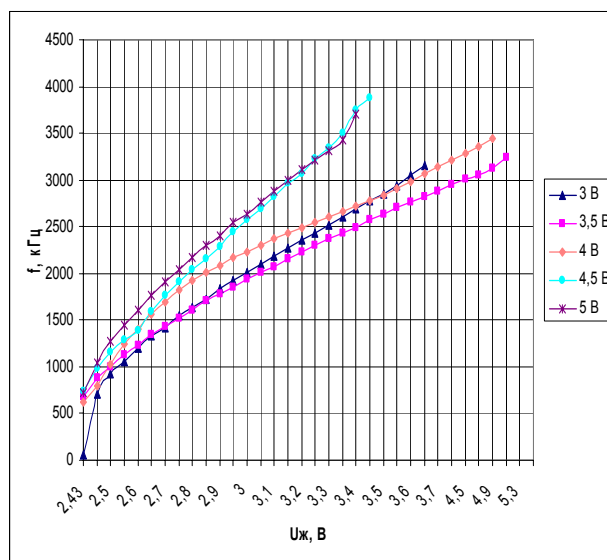


Рис. 7. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення

Підключення пасивної індуктивності до виводів колектор-колектор структури при від’ємних значеннях повного комплексного опору (при компенсації втрат енергії в коливальному контурі), дозволяє створити генератор електричних коливань. При дії зміни температури на датчик здійснюється зміна активної та реактивної складової повного комплексного опору, що в свою чергу, змінює частоту генерації. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення представлена на рис. 7 і має практично лінійний характер.

На рис. 8 подано експериментальну залежність частоти генерації від температури (при різних

напругах керування), що має практично лінійний характер.

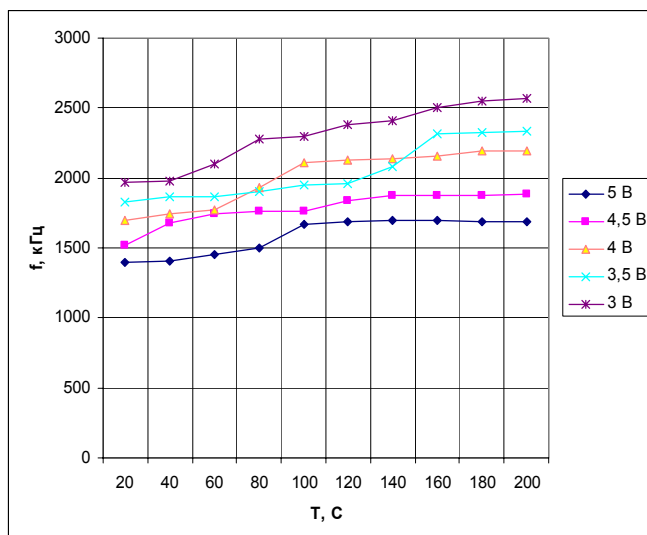


Рис. 8. Експериментальна залежність частоти генерації від температури

Здійснивши ряд досліджень та провівши розрахунок кола оптико-частотного температурного сенсора, було визначено, що активна складова повного комплексного опору приймає від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер та їх залежності від напруги живлення, встановлено ряд взаємозв'язків між частотою генерації та напругою живлення, частотою генерації та температурою.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

1. Вперше запропоновано новий підхід для безконтактного вимірювання температури на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.
2. Вперше розроблено математичну модель оптико-частотного сенсора температури на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором, яка на відміну від уже існуючих враховує зміну активної та реактивної складових повного опору від зміни інфрачервоного випромінювання.
3. Отримано аналітичний вираз для розрахунку повного опору оптико-частотного сенсора температури, який дозволяє визначити активну і реактивну складову повного опору від дії інфрачервоного випромінювання.
4. Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність розроблених математичних моделей з похибкою $\pm 5\%$.

Література

1. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-електронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 246 с.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Кравчук Н.С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 163 с.
3. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
4. Пат. України № 33239. Оптичний сенсор температури з частотним виходом/ Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В. 10.06.2008.
5. Пат. України № 33240. Мікроелектронний оптичний сенсор температури з частотним виходом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Деундяк В.П., Деундяк М.В. 10.06.2008.

Надійшла 5.3.2009 р.