

УДК 681.586.776:621.382

В. С. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;

О. В. Осадчук, д-р техн. наук, проф.;

О. М. Ільченко, асп.

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ГУСТИНИ ОПТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Розроблено математичну модель мікроелектронного перетворювача густини оптичної потужності на основі МДН-транзисторів та кремнієвого сонячного елемента. На основі моделі отримано аналітичні залежності для функції перетворення та рівняння чутливості.*

### Вступ та постановка задачі досліджень

Стрімкий розвиток сенсорної техніки висуває нові вимоги до систем моніторингу і управління фізичними процесами, дослідження космічного простору, ядерної енергетики. Зокрема, до фоточутливих перетворювачів висуваються жорсткі вимоги: вони повинні бути економічними, забезпечувати високу точність вимірювання, мати мінімальні габарити і вагу, бути сумісними з сучасними ЕОМ [1]. Цим вимогам відповідають фоточутливі перетворювачі, у яких інформативним параметром є частота. Адаже виникає можливість підвищення завадостійкості та отримання великих вихідних сигналів [2].

На цей час стала проблема перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на космічні відстані. Таке перетворення можливо зробити з використанням напівпровідникових приладів з від'ємним опором, а також напівпровідникових фотоелементів, зокрема, кремнієвих сонячних елементів. Ці пристрої є сьогодні цілком придатними в науковому і технологічному відношенні для того, щоб розглядатися як технічна база для широкомасштабної сонячної електроенергетики майбутнього [3]. Тому у цій роботі досліджуються характеристики оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому коливальний контур утворено на основі ємнісної складової повного вихідного опору, а роль індуктивної складової виконує біполярний транзистор з RC-колом, що дозволяє виготовити перетворювач за інтегральною технологією.

Для виявлення властивостей частотного оптичного перетворювача необхідно розробити математичну модель, на основі якої можна визначити функцію перетворення та рівняння чутливості оптичного перетворювача. Ці питання розглядаються у статті.

### Математична модель

Схему мікроелектронного оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів з чутливим елементом — кремнієвим сонячним елементом розміром  $5 \times 10$  мм, показано на рис. 1. Еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора утворюється ємнісною складовою повного опору на електродах стік—стік МДН-транзисторів VT1 і VT2.

Для визначення функції перетворення перетворювача необхідно розрахувати повний опір на електродах стік—стік МДН-транзисторів VT1 і VT2 згідно з його еквівалентною схемою для змінного струму (рис. 2).

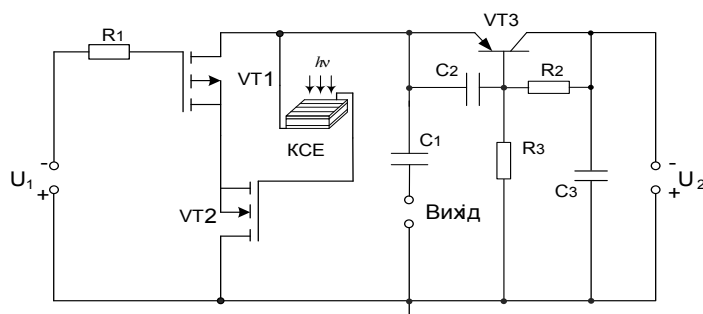


Рис. 1. Схеми мікроелектронного перетворювача густини оптичної потужності на основі кремнієвого сонячного елемента:  
 $U_1$  — напруга керування;  $U_2$  — напруга живлення

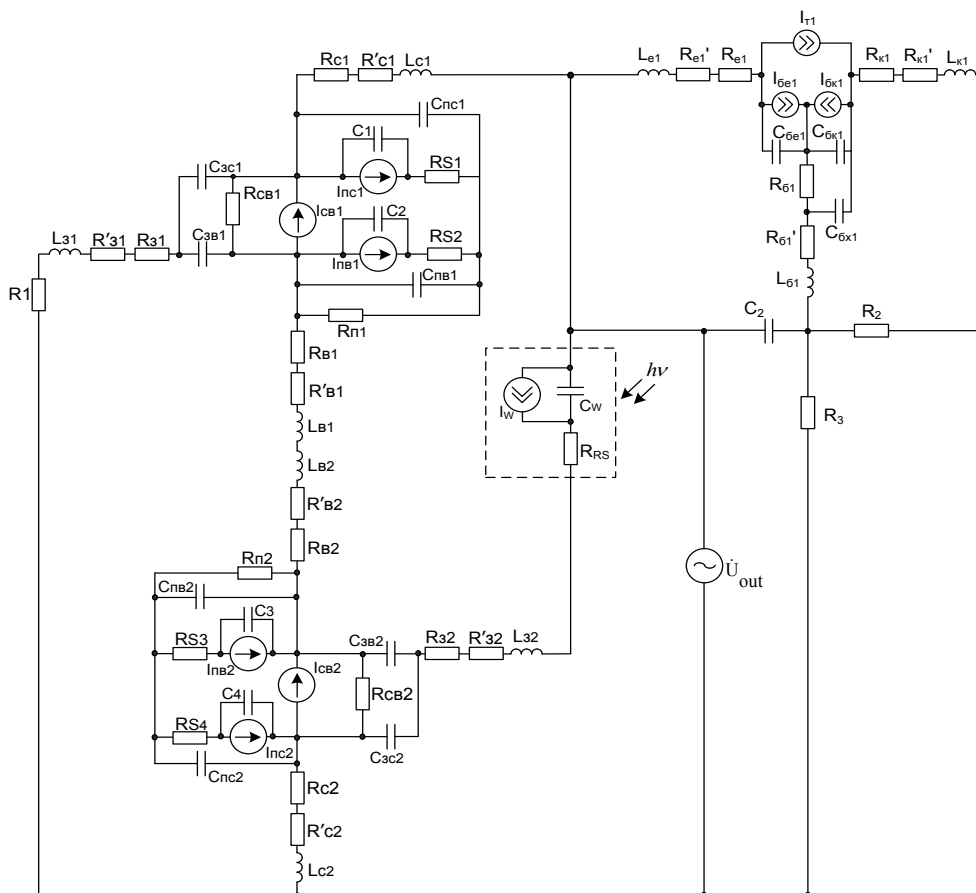


Рис. 2. Еквівалентна схема оптичного перетворювача за змінним струмом

Перетворимо її у зручнішу для проведення розрахунків (рис. 3) схему.

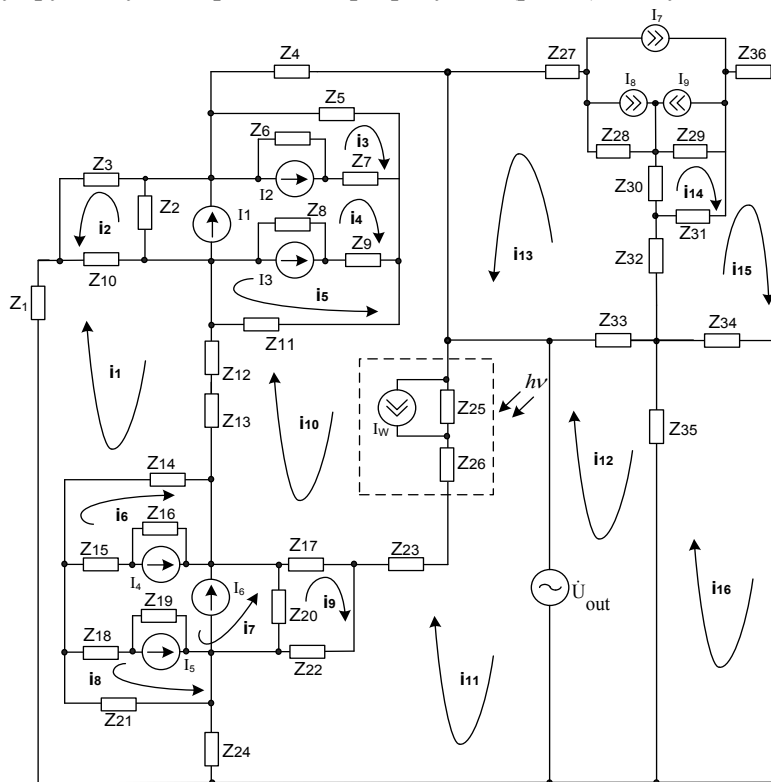


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема оптичного перетворювача за змінним струмом

Система рівнянь Кірхгофа згідно з перетвореною еквівалентною схемою за змінним струмом має вигляд

$$\begin{cases}
 0 = (Z_1 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{21} + Z_{24})i_1 + Z_{10}i_2 - (Z_{12} + Z_{13})i_{10} - \\
 \quad - Z_{14}i_6 + Z_{21}i_8 - Z_{24}i_{11}; \\
 0 = (Z_3 + Z_{10} + Z_2)(i_2 - I_1) + Z_2(i_4 - I_1) + Z_{10}i_1; \\
 0 = (Z_5 + Z_6 + Z_7)(i_3 + I_2) - Z_5i_{10} - Z_7i_4 + Z_6(-i_4 + I_2); \\
 0 = (Z_6 + Z_7 + Z_9 + Z_8 + Z_2)(i_4 + I_3 - I_2 - I_1) + Z_6(-i_3 - I_2) - Z_7i_3 + \\
 \quad + Z_9i_5 + Z_8(i_5 + I_3) + Z_2(i_2 - I_1); \\
 0 = (Z_9 + Z_8 + Z_{11})(i_5 + I_3) + Z_8(i_4 + I_3) + Z_9i_4 + Z_{11}i_{10}; \\
 0 = (Z_{14} + Z_{15} + Z_{16})(i_6 + I_4) - Z_{14}i_1 + Z_{15}i_7 + Z_{16}(i_7 + I_4); \\
 0 = (Z_{15} + Z_{16} + Z_{20} + Z_{19} + Z_{18})(i_7 - I_6 + I_4 - I_5) + Z_{16}(i_6 + I_4) + \\
 \quad + Z_{15}i_6 - Z_{18}i_8 + Z_{19}(-i_8 - I_5) + Z_{20}(i_9 - I_6); \\
 0 = (Z_{21} + Z_{19} + Z_{18})(i_8 + I_5) - Z_{18}i_7 + Z_{19}(-i_7 + I_5) + Z_{21}i_1; \\
 0 = (Z_{17} + Z_{20} + Z_{22})(i_9 - I_6) - Z_{17}i_{10} + Z_{20}(i_7 - I_6) - Z_{22}i_{11}; \\
 0 = (Z_4 + Z_5 + Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{17} + Z_{23} + Z_{26} + Z_{25})(i_{10} - I_w) - Z_5i_3 + \\
 \quad + Z_{11}i_5 - (Z_{12} + Z_{13})i_1 - Z_{17}i_9 - (Z_{23} + Z_{26} + Z_{25})(i_{11} + I_w); \\
 \dot{U}_{out} = (Z_{23} + Z_{26} + Z_{25} + Z_{24} + Z_{22})(i_{11} + I_w) - (Z_{23} + Z_{26} + Z_{25})(i_{10} - I_w) - \\
 \quad - Z_{22}i_9 - Z_{24}i_1, \\
 \dot{U}_{out} = (Z_{33} + Z_{35})i_{12} + Z_{33}i_{13} - Z_{35}i_{16}; \\
 0 = (Z_{27} + Z_{28} + Z_{30} + Z_{32} + Z_{33})i_{13} + Z_{28}(I_8 + I_7) + Z_{30}i_{14} + Z_{32}i_{15} + Z_{33}i_{12}; \\
 0 = (Z_{29} + Z_{30} + Z_{31})i_{14} + Z_{29}(I_9 - I_7) + Z_{30}i_{13} - Z_{31}i_{15}; \\
 0 = (Z_{36} + Z_{34} + Z_{32} + Z_{31})i_{15} - Z_{31}i_{14} + Z_{32}i_{13} - Z_{34}i_{16}; \\
 0 = (Z_{34} + Z_{35})i_{16} - Z_{34}i_{15} - Z_{35}i_{12},
 \end{cases} \quad (1)$$

де  $Z_1 = R_1 + R_{31} + R'_{31} + j\omega L_{31}$ ;  $Z_2 = R_{cb1}$ ,  $Z_3 = -j/(\omega C_{3c1})$ ;  $Z_4 = R_{c1} + R'_{c1} + j\omega L_{c1}$ ;  
 $Z_5 = -j/(\omega C_{nc1})$ ;  $Z_6 = -j/(\omega C_1)$ ;  $Z_7 = R_{S1}$ ;  $Z_8 = -j/(\omega C_2)$ ;  $Z_9 = R_{S2}$ ;  $Z_{10} = -j/(\omega C_{3b1})$ ;  
 $Z_{11} = \frac{R_{\pi 1}}{1 + \omega^2 R_{\pi 1}^2 C_{\pi b 1}^2} - j \frac{\omega R_{\pi 1}^2 C_{\pi b 1}}{1 + \omega^2 R_{\pi 1}^2 C_{\pi b 1}^2}$ ;  $Z_{12} = R_{b1} + R'_{b1} + j\omega L_{b1}$ ;  $Z_{13} = R_{b2} + R'_{b2} + j\omega L_{b2}$ ;  
 $Z_{14} = \frac{R_{\pi 2}}{1 + \omega^2 R_{\pi 2}^2 C_{\pi b 2}^2} - j \frac{\omega R_{\pi 2}^2 C_{\pi b 2}}{1 + \omega^2 R_{\pi 2}^2 C_{\pi b 2}^2}$ ;  $Z_{15} = R_{S3}$ ;  $Z_{16} = -j/(\omega C_3)$ ;  $Z_{17} = -j/(\omega C_{3b2})$ ;  
 $Z_{18} = R_{S4}$ ;  $Z_{19} = -j/(\omega C_4)$ ;  $Z_{20} = R_{cb2}$ ;  $Z_{21} = -j/(\omega C_{nc2})$ ;  $Z_{22} = -j/(\omega C_{3c2})$ ;  
 $Z_{23} = R_{32} + R'_{32} + j\omega L_{32}$ ;  $Z_{24} = R_{c2} + R'_{c2} + j\omega L_{c2}$ ;  $Z_{25} = -j/(\omega C_w)$ ;  $Z_{26} = R_{RS}$ ;  
 $Z_{27} = R_{e1} + R'_{e1} + j\omega L_{e1}$ ;  $Z_{28} = -j/(\omega C_{6e1})$ ;  $Z_{29} = -j/(\omega C_{6k1})$ ;  $Z_{30} = R_{61}$ ;  $Z_{31} = -j/(\omega C_{6x1})$ ;  
 $Z_{32} = R'_{61} + j\omega L_{61}$ ;  $Z_{33} = -j/(\omega C)$ ;  $Z_{34} = R_2$ ,  $Z_{35} = R_3$ ,

$R_1$  — навантажувальний опір;  $R_3$  — омичний опір електрода затвора;  $R_{3b}$  — опір між електродами затвора і витоку;  $R_{cb}$  — опір стік-витік;  $R_c$  — опір  $p-n$  переходу стоку;  $R_b$  — опір  $p-n$  переходу витоку;  $R_n$  — опір підкладки;  $R_{S1}$ ,  $R_{S4}$  — об'ємні опори  $p-n$  переходу підкладка—стік;  $R_{S2}$ ,  $R_{S3}$  — об'ємні опори  $p-n$  переходу підкладка—витік;  $L_3$  — індуктивність електрода затвора;  $C_{3c}$  — ємність затвор-стік;  $C_{3b}$  — ємність затвор-витік;  $C_{nc}$  — ємність підкладка—стік;  $C_1$ ,  $C_4$  — ємність  $p-n$  переходу стоку;  $C_2$ ,  $C_3$  — ємність  $p-n$  переходу витоку;  $C_{\pi b}$  — ємність підкладка—витік;  $L_c$  — індуктивність електрода стоку;  $L_b$  — ін-

дуктивність електрода витоку;  $C_w$  — ємність сонячного елемента;  $C_{6к1}$ ,  $C_{6е1}$  — ємність переходу база—колектор та база—емітер транзистора VT3 відповідно,  $C_{6х1}$  — ємність між зовнішнім виводом бази і колектора транзистора VT3;  $R_{61}$ ,  $R_{к1}$ ,  $R_{е1}$  — об’ємний опір бази, колектора і емітера транзистора VT3,  $I_1$ ,  $I_6$  — струми стоку-витоку;  $I_2$ ,  $I_5$  — струми переходів підкладка—стік;  $I_3$ ,  $I_4$  — струм переходів підкладка-витік;  $I_8$ ,  $I_9$  — струм база—емітер та струм база-колектор;  $I_w$  — фотострум сонячного елемента;  $R_2$  і  $C$  — опір та ємність резистора та конденсатора фазозсувного кола відповідно.

Значення параметрів еквівалентної схеми взяті з роботи [4]. Ємність емітерного переходу

$$C_{be} = C_{едиф} + C_{ебар}, \quad C_{едиф} = \tau / (m_e \cdot \Phi_T) (I_{едиф} - I_{beo});$$

$$C_{ебар} = C_{ебар.о} [U_{кон.е} / (U_{кон.е} - U_e)] n_e,$$

де  $C_{едиф}$ ,  $C_{ебар}$  — дифузійна та бар’єрна ємності емітерного переходу;  $\tau$  — ефективний час життя неосновних носіїв бази при нормальному включенні біполярного транзистора,  $C_{ебар.о}$  — бар’єрна ємність емітерного переходу з нульовою напругою зміщення;  $U_{кон.е}$  — контактна різниця потенціалу емітерного переходу;  $n_e$  — коефіцієнт, який залежить від характеру переходу.

Ємність колекторного переходу

$$C_{bc} = C_{сдиф} + C_{сбар}, \quad C_{сдиф} = \frac{\tau_i}{m_c \Phi_T} (I_{сдиф} - I_{bco});$$

$$C_{сбар} = C_{сбар.о} [U_{кон.с} / (U_{кон.с} - U_c)]^{n_c}.$$

Систему рівнянь (1) розв’язано за допомогою пакету прикладних програм «Matlab 5.2», що дозволило отримати значення повного опору, активна складова якого має від’ємне значення, а реактивна — ємнісний характер.

На рис. 4 показано залежність частоти генерації від напруги живлення за різної напруги керування. З наведених графіків видно, що зі збільшенням напруги керування збільшується частотна область генерації. Найбільший діапазон зміни частоти існує для напруги керування  $U_1 = 8$  В. Однак для напруги керування  $U_1 = 7$  В існує залежність з меншим відхиленням від лінійності частоти генерації від напруги живлення  $U_2$ .

Так, для напруги керування  $U_1 = 7$  В і у разі збільшення напруги живлення  $U_2$  від 5,3 В до 6,6 В частота генерації зменшується від 922 кГц до 474 кГц.

Для визначення функції перетворення необхідно на основі розв’язання системи рівнянь Кірхгофа (1) знайти залежність частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання. Функція перетворення в цьому випадку буде мати вигляд

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{D} - (L_{екв} B - R_{п2}^2 C_{пв2}^2 A - R_{п2}^2 C_{пв2} B)}{2L_{екв} B R_{п2}^2 C_{пв2}^2}}, \quad (2)$$

де  $A = C_{зв2} C_{пс2} + C_w(P) C_{пс2} + C_w(P) C_{зв2}$ ;  $B = C_w(P) C_{пс2} C_{зв2}$ ;

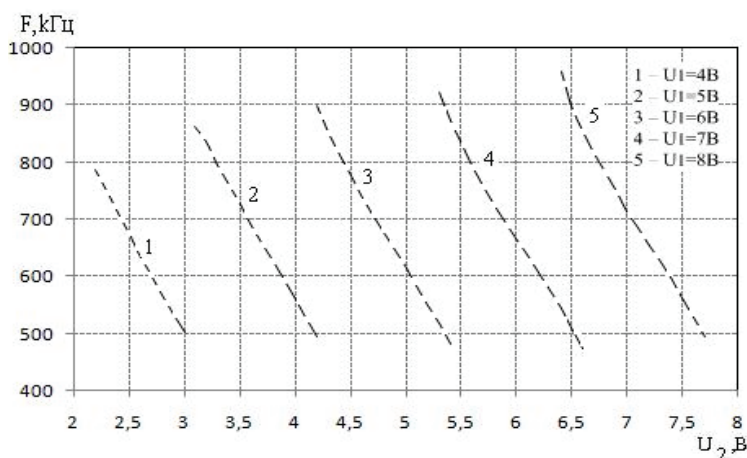


Рис. 4. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення  $U_2$

$$D = (L_{\text{екв}}B - R_{\text{п2}}^2C_{\text{пв2}}^2A - R_{\text{п2}}^2C_{\text{пв2}}B)^2 - 4L_{\text{екв}}BR_{\text{п2}}^2C_{\text{пв2}}^2A.$$

У формулі (2)  $L_{\text{екв}}$  — еквівалентна індуктивність активного індуктивного елемента (рис. 5), утвореного транзистором VT3 та фазозсувним колом на основі резистора  $R_2$  та конденсатора  $C_2$ .

Для визначення повного опору складемо систему рівнянь Кірхгофа:

$$\begin{cases} U_1 = A_1i_1 + Z_{33}i_2 + Z_{35}i_5; \\ 0 = -Z_{33}i_1 + A_2i_2 + Z_{30}i_3 + A_3; \\ 0 = Z_{30}i_2 + A_4i_3 + Z_{31}i_4 + A_5; \\ 0 = Z_{31}i_3 + A_6i_4 - Z_{34}i_5; \\ 0 = Z_{35}i_1 - Z_{34}i_4 + A_7i_5, \end{cases} \quad (3)$$

де  $A_1 = Z_{33} + Z_{35}$ ;  $A_2 = Z_{33} + Z_{27} + Z_{28} + Z_{30}$ ;

$A_3 = Z_{28}(-I_8 + I_9 + I_7)$ ;  $A_4 = Z_{30} + Z_{29} + Z_{31}$ ;  $A_5 = Z_{29}(-I_9 + I_8 + I_7)$ ;  $A_6 = Z_{36} + Z_{34} + Z_{31}$ ;

$A_7 = Z_{34} + Z_{35}$ .

Розв'язавши систему рівнянь (3) відносно струму  $i_1$ , визначимо повний опір транзитторного еквівалента індуктивності:

$$Z_{\text{екв}} = U_1/i_1 = U_1 / \left( \frac{Z_{30}B_3B_1A_7Z_{33}}{B_4B_2Z_{35}Z_{34}Z_{31}} + \frac{Z_{30}B_1A_7}{B_4Z_{35}Z_{34}Z_{31}} + \frac{A_2B_3}{B_4B_2} \right) \left( U_1 + \frac{A_2A_5}{B_4B_2} + \frac{Z_{30}B_1A_7Z_{33}A_5}{B_4Z_{35}Z_{34}Z_{31}B_2} - \frac{A_3}{B_4} \right),$$

де  $B_1 = A_6 - Z_{34}^2/A_7$ ;  $B_2 = Z_{30} + \frac{A_4B_1A_7Z_{33}}{Z_{35}Z_{34}Z_{31}} - \frac{Z_{31}A_7Z_{33}}{Z_{35}Z_{34}}$ ;  $B_3 = \frac{Z_{31}A_7}{Z_{35}Z_{34}} - \frac{A_4B_1A_7}{Z_{35}Z_{34}Z_{31}}$ ;

$$\begin{aligned} B_4 = & -Z_{33} - \frac{A_2A_4B_1A_7A_1}{B_2Z_{35}Z_{34}Z_{31}} + \frac{A_2A_4Z_{35}Z_{34}}{B_2A_7Z_{31}} + \frac{A_2A_4B_1Z_{35}}{Z_{34}Z_{31}} + \frac{A_2Z_{31}A_7A_1}{B_2Z_{35}Z_{34}} - \frac{A_2Z_{31}Z_{35}Z_{34}}{B_2B_1A_7} \\ & - \frac{A_2Z_{31}A_7^2Z_{35}}{B_2Z_{34}} + \frac{A_2Z_{31}Z_{34}Z_{35}}{B_2A_7B_1} + \frac{Z_{30}B_1A_7A_1}{Z_{35}Z_{34}Z_{31}} - \frac{Z_{30}Z_{35}Z_{34}}{A_7Z_{31}} - \frac{Z_{30}B_1Z_{35}}{Z_{34}Z_{31}} - \frac{Z_{30}Z_{33}A_4B_1^2A_7^2A_1}{B_2Z_{35}^2Z_{34}^2Z_{31}^2} \\ & + \frac{Z_{30}B_1A_7Z_{33}A_4}{Z_{31}^2B_2A_7} + \frac{Z_{30}B_1^2A_7Z_{33}A_4}{Z_{34}^2Z_{31}^2} + \frac{Z_{30}B_1A_7^2Z_{33}A_1}{Z_{35}^2Z_{34}^2B_2} - \frac{Z_{30}B_1Z_{33}A_7^3}{Z_{34}^2B_2}. \end{aligned}$$

Залежність частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання, визначена експериментально та розрахована за формулою (2) для випромінювання з довжиною хвилі 850 нм, показана на рис. 6.

З графіка видно, що зі збільшенням густини оптичної потужності спостерігається зменшення частоти генерації. Розбіжність теоретичної та експериментальної складових не перевищує  $\pm 5\%$ .

Чутливість перетворювача, отримана з виразу (2), визначається з формули

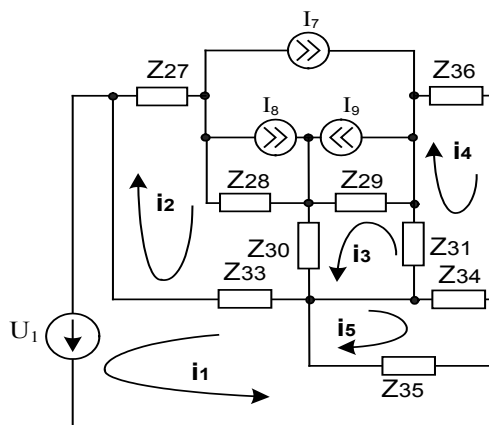


Рис. 5. Перетворена еквівалентна схема активного індуктивного елемента за змінним струмом

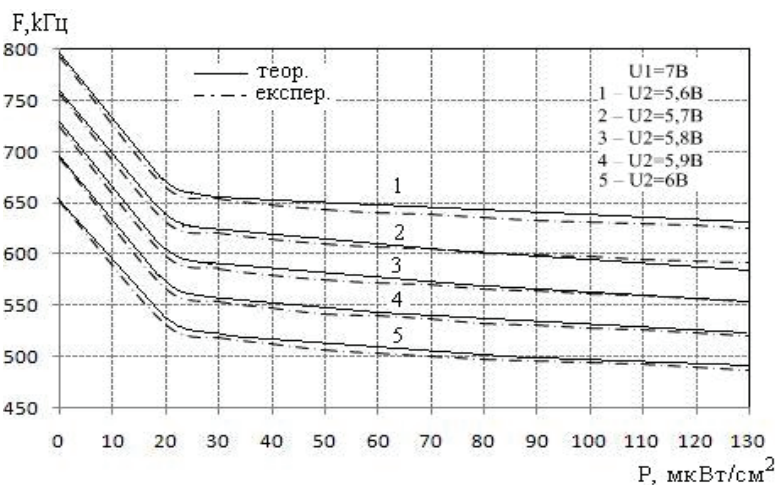


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації від густини потужності оптичного випромінювання

$$\begin{aligned}
S_P^F = \frac{1}{8} \sqrt{2} & \left[ \left( D_1 L_{\text{екв}} \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} - D_1 R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} - \right. \right. \\
& - D_1 R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{зв2}} - D_1 R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}} \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} - \\
& - 2L_{\text{екв}} \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 (C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} + C_w(P) C_{\text{пс2}} + C_w(P) C_{\text{зв2}}) - \\
& - 2L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \left( \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} + \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{зв2}} \right) \Big] / \sqrt{D_2} - \\
& - L_{\text{екв}} \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} + R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} + R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{зв2}} + \\
& + R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}} \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} \Big] / \left( L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \right) - \\
& - \left( \left( \sqrt{D_2} - D_1 \right) \left( \frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) \right) / \left( L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \right) \Big] / \\
& / \pi \sqrt{\left( \sqrt{D_2} - D_1 \right) / \left( L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 \right)}, \tag{4}
\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
D_1 = L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} - R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 (C_{\text{зв2}} C_{\text{пс2}} + C_w(P) C_{\text{пс2}} + C_w(P) C_{\text{зв2}}) - \\
- R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_2 = \left( L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} - R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}}^2 (C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} + C_w(P) C_{\text{пс2}} + C_w(P) C_{\text{зв2}}) - R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} \right)^2 - \\
- 4L_{\text{екв}} C_w(P) C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} R_{\text{п2}}^2 C_{\text{пв2}} (C_{\text{пс2}} C_{\text{зв2}} + C_w(P) C_{\text{пс2}} + C_w(P) C_{\text{зв2}}).
\end{aligned}$$

На рис. 7 зображено залежність чутливості оптичного перетворювача від величини густини оптичної потужності.

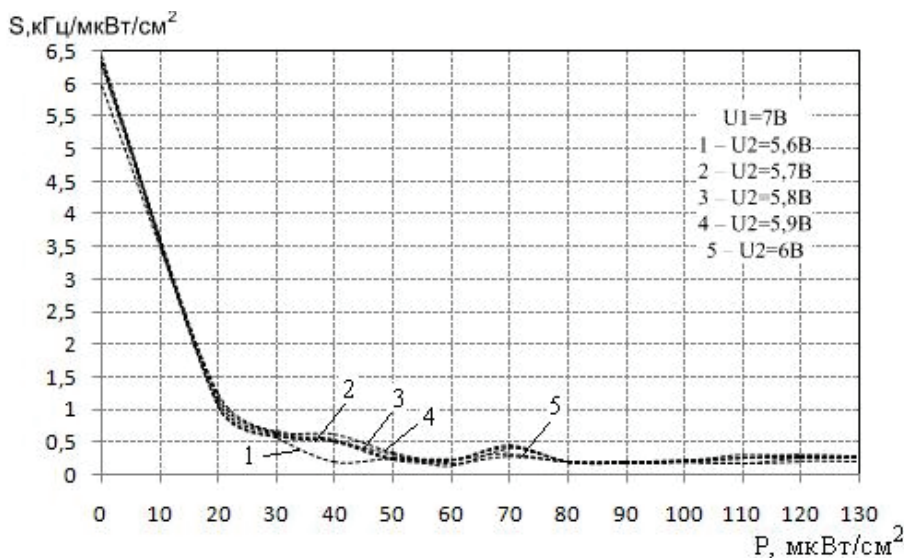


Рис. 7. Залежність чутливості перетворювача від густини оптичної потужності

Теоретичні та експериментальні залежності показали, що чутливість розробленого оптичного перетворювача складає 0,2...6,4 кГц/мкВт/см<sup>2</sup>. Максимальну чутливість перетворювач має за напруги живлення 5,6 В та напруги керування 7 В.

## Висновки

1. Отримано аналітичний вираз функції перетворення та рівняння чутливості на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного перетворювача на основі автогенератора з двома МДН-транзисторами та активним індуктивним елементом на основі біполярного транзистора з фазозсувним RC-колом. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить  $\pm 5\%$ .

2. Залежність частоти генерації від густини оптичної потужності доводить, що частота генерації більша в діапазоні  $0 \dots 20$  мкВт/см<sup>2</sup>, а в діапазоні  $20 \dots 130$  мкВт/см<sup>2</sup> змінюється лінійно. При цьому чутливість розробленого оптичного перетворювача складає  $0,2 \dots 6,4$  кГц/мкВт/см<sup>2</sup>.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук Александр Владимирович. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением : моног. / А. В. Осадчук. — Винница : Континент, 1998. — 130 с.
2. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками. / П. В. Новицкий, В. Г. Кноринг, В. С. Гутников. — Ленинград : Энергия, 1970. — 424 с.
3. Алферов Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев. // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38. — № 8. — С. 937—947.
4. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. — М. : Радио и связь, 1992. — Вып. 2. — 72 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Стаття надійшла до редакції 23.02.11  
Рекомендована до друку 3.03.11

**Осадчук Володимир Степанович** — професор, **Ільченко Олена Миколаївна** — аспірантка.

Кафедра електроніки;

**Осадчук Олександр Володимирович** — завідувач кафедри радіотехніки;

Вінницький національний технічний університет, Вінниця