

В. С. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;
О. В. Осадчук, д-р. техн. наук, проф.;
О. М. Ільченко, асп.

ОПТИЧНИЙ ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ СОНЯЧНОЇ БАТАРЕЇ ТА ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Показана можливість перетворення потужності оптичного випромінювання в частотний вихідний сигнал на основі автогенераторного пристрою, який складається з біполярного та двозатворного МДН-транзисторів, і в якому фоточутливим елементом є сонячна батарея. Отримано аналітичні залежності для функції перетворення та рівняння чутливості.

Вступ та постановка задачі досліджень

На сьогоднішній день існує проблема перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на відстань. Зокрема, це стосується метеорологічних вимірювань (сонячна радіація, інтенсивність УФ променів). Більшість метеостанцій досить часто розташовані автономно у віддалених, безлюдних районах, без інфраструктури, тому основною задачею для метеорологів все ще залишається забезпечення безперебійного енергопостачання та отримання даних від сенсорів. Енергосистеми сонячних батарей є надійним і економічним джерелом струму, що доводить їх актуальність [1]. Також важливим питанням є сприймання, обробка, зберігання і передача вимірних даних в інформаційні центри. У метеостанції з радіоз'єднанням можна використовувати більші дистанції між сенсором і блоком пам'яті, оскільки передача даних здійснюється по радіоканалу. Таким чином, постає важлива задача одночасного вимірювання певних величин в об'єкті вимірювання та передачі вимірної інформації на відстань. Реалізації такої задачі присвячена дана робота, першим етапом якої буде дослідження процесу перетворення оптичної потужності в частотний сигнал на основі транзисторних структур з від'ємним опором.

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

Математична модель

Ефективно вирішити проблему дистанційного вимірювання потужності оптичного випромінювання дозволяє автогенераторний пристрій (рис. 1) [2], який можливо інтегрувати в систему вимірювання оптичної потужності на основі поєднання з інформаційними технологіями для сприймання, обробки і передачі вимірної інформації на відстань [3, 4].

Принцип дії перетворювача ґрунтується на зміні оптичної потужності, що приймається сонячною батареєю SP. Таким чином змінюється вихідна напруга на сонячній батареї, яка приводить до зміни ємності варикапа VD, що в свою чергу змінює ємнісну складову повного опору на електродах стік-колектор двозатворного МДН-транзистора VT2 і біполярного транзистора VT1, а це викликає зміну резонансної частоти коливального контуру, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним характером на електродах стік-колектор та пасивної індуктивності L1.

В пристрої (див. рис. 1) сонячна батарея є чутливим елементом, який перетворює сонячну енер-

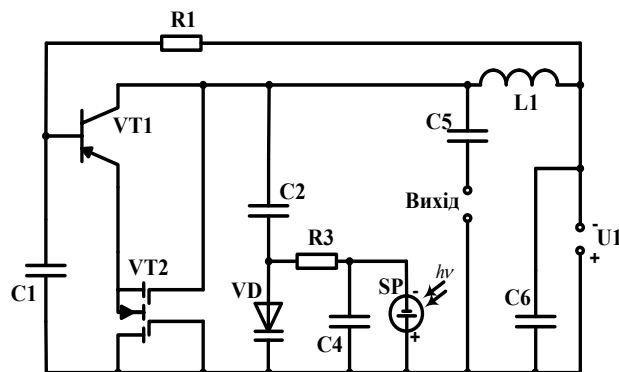


Рис. 1. Електрична схема перетворювача на основі біполярного транзистора та двозатворного МДН-транзистора з сонячною батареєю

гію в електричну енергію. Однак можливий інший варіант конструкторсько-технологічного рішення реалізації перетворювача оптичної потужності з використанням сонячної батареї як альтернативного автономного джерела живлення оптичного перетворювача [5]. Адже на сьогоднішній день енергетичні ресурси землі вичерпуються. Тому необхідно здійснювати пошук нових принципів реалізації приладів, що відрізняються багатofункціональністю, малим споживанням енергії, високою чутливістю тощо. І перетворювач оптичної потужності з автономним живленням на основі сонячної батареї дозволяє ефективно виконати ті умови, які диктує сьогоднішня ситуація в світі. Тому що у такій реалізації виникає можливість одночасного вимірювання потужності оптичного випромінювання і живлення оптичного перетворювача за допомогою сонячної батареї.

Але існує певний недолік, а саме: використовуючи сонячну батарею як джерело живлення в перетворювачі на основі біполярного та двозатворного МДН-транзистора, можна вимірювати оптичну потужність, починаючи з певного мінімального значення, при якому спрацьовує перетворювач, а не з нульового значення оптичної потужності, як це виконується в пристрої, показаному на рис. 1.

Таким чином, зважаючи на вищесказане, для досліджень обрано перетворювач на основі біполярного транзистора та двозатворного МДН-транзистора з сонячною батареєю в якості чутливого елемента.

Для визначення основних параметрів, що характеризують роботу оптичного перетворювача (див. рис. 1), необхідно розрахувати повний опір на електродах стік-колектор транзистора VT2 і VT1 згідно з еквівалентною схемою перетворювача для змінного струму (рис. 2).

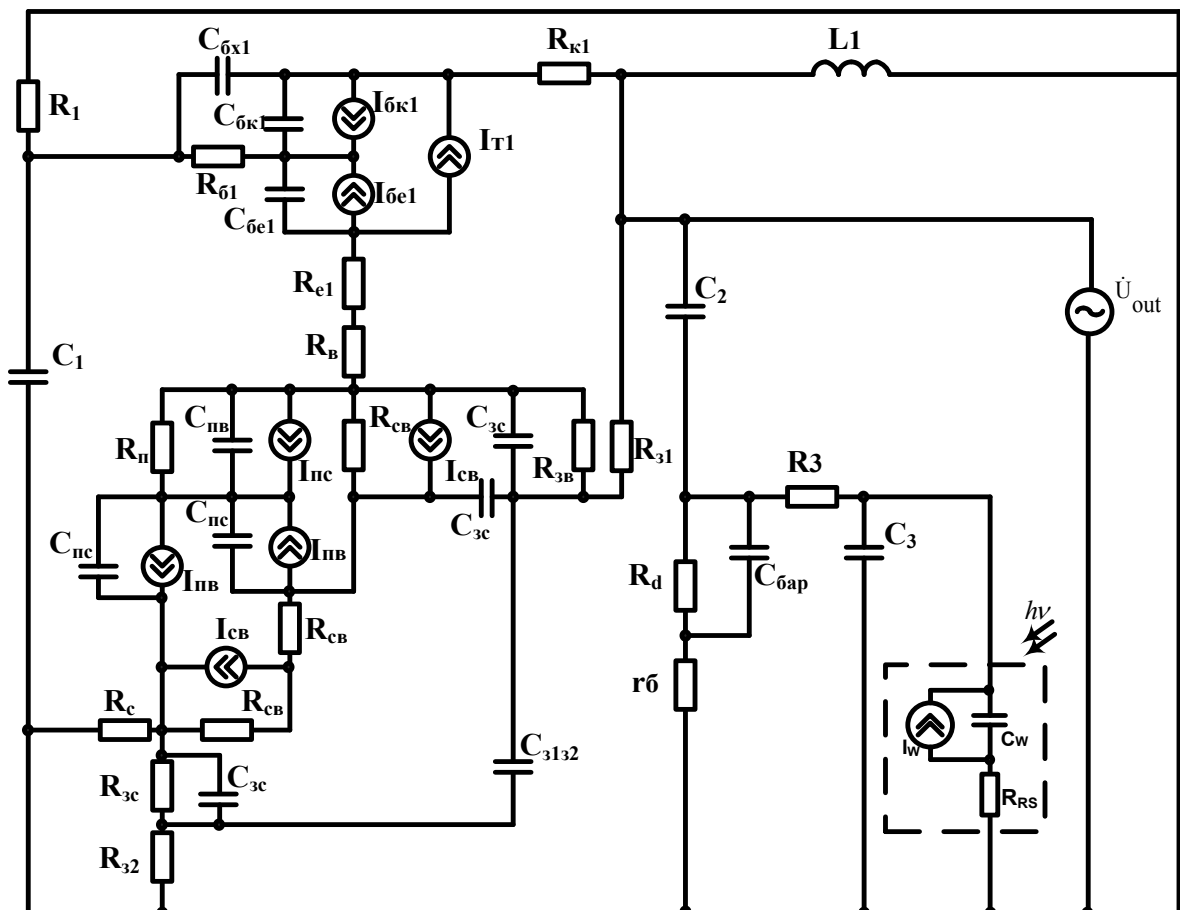


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача з сонячною батареєю за змінним струмом

В еквівалентній схемі на рис. 2 використано такі позначення: R_1 — опір резистора R_1 на схемі перетворювача рис. 1; R_{61} , R_{k1} , R_{e1} — об'ємний опір бази, колектора і емітера біполярного транзистора VT1 відповідно; R_b , R_c , R_{31} та R_{32} — об'ємні опори витoku, стоку та першого і другого затворів двозатворного МДН-транзистора VT2 відповідно; R_n — опір підкладки МДН-

транзистора $VT2$; R_{CB} — об'ємний опір стік-витік МДН-транзистора $VT2$; $R_{ЗВ}$ — об'ємний опір затвор-витік МДН-транзистора $VT2$; $R_{З1}$ — об'ємний опір затвору МДН-транзистора $VT2$; R_c — опір $p-n$ переходу стоку МДН-транзистора $VT2$; $R_{Зс}$ — опір затвор-стік МДН-транзистора $VT2$; C_1, C_2, C_3 — ємності конденсаторів C_1, C_2 та C_3 на схемі перетворювача; C_w — ємність сонячної батареї; $C_{6к1}, C_{6е1}$ — ємність переходу база-колектор та база-емітер транзистора $VT1$ відповідно; C_{6x1} — ємність між зовнішнім виводом бази і колектора біполярного транзистора $VT1$; $C_{пв}$ — ємність підкладка-витік МДН-транзистора $VT2$; $C_{пс}$ — ємності підкладка-стік МДН-транзистора $VT2$; $C_{Зс}$ — ємності затвор-стік МДН-транзистора $VT2$; $C_{ЗВ}$ — ємність затвор-витік МДН-транзистора $VT2$; C_{3132} — ємність між першим і другим затвором МДН-транзистора $VT2$; $C_{6ар}$ — бар'єрна ємність $p-n$ переходу варикапа VD ; R_d — опір $p-n$ переходу варикапа VD ; r_b — омичний опір бази варикапа VD ; R_{RS} — опір сонячної батареї; R_3 — опір резистора R_3 на схемі перетворювача.

Для проведення розрахунків схему на рис. 2 перетворено у зручнішу, показану на рис. 3.

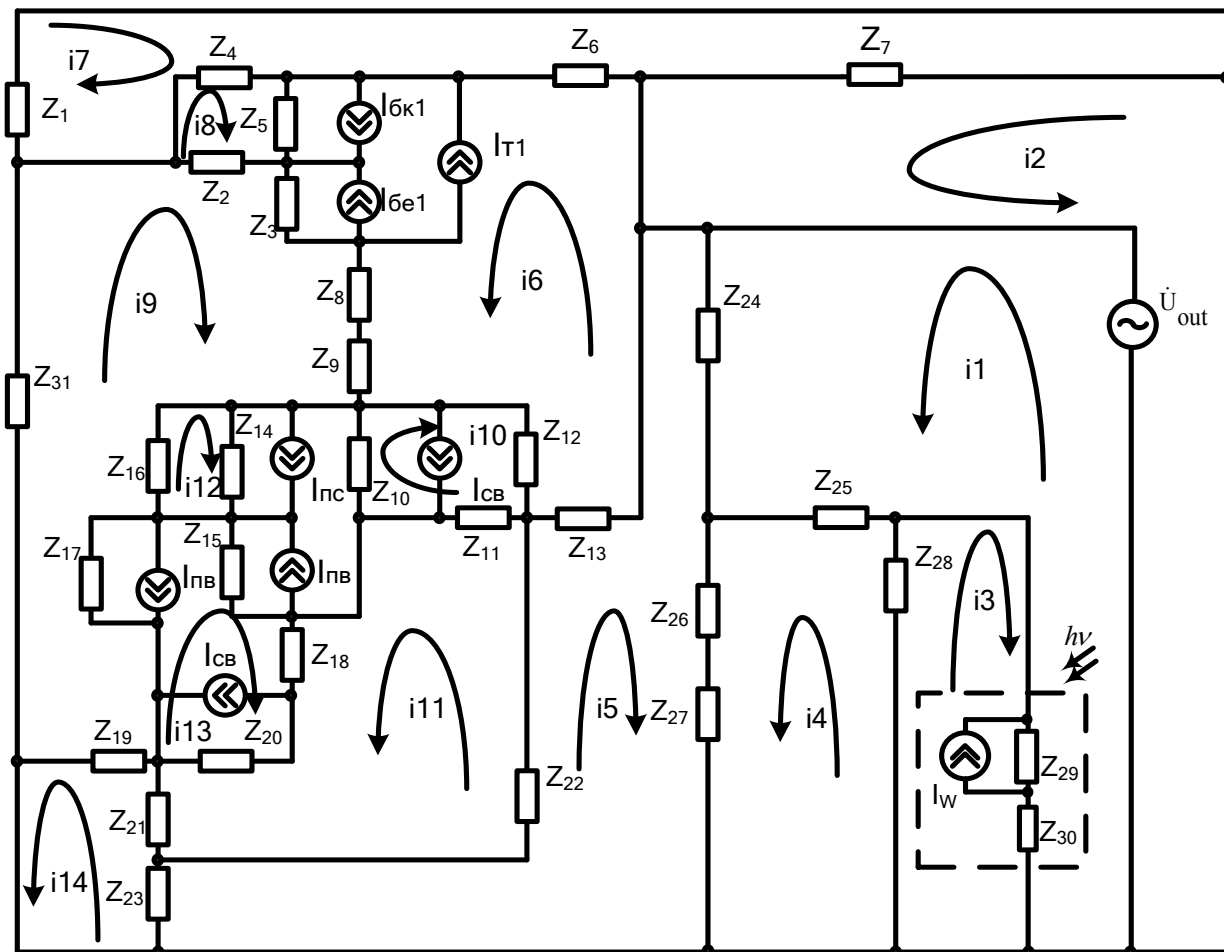


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема перетворювача з сонячною батареєю

Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від величини потужності оптичного випромінювання. Система рівнянь Кірхгофа, складена на основі еквівалентної схеми (рис. 3), має вигляд

$$\begin{cases}
 \dot{U}_{out} = (Z_{24} + Z_{25} + Z_{29} + Z_{30})i_1 + Z_{24}i_5 - Z_{25}i_4 + (Z_{29} + Z_{30})i_3 + Z_{29}I_w; \\
 \dot{U}_{out} = Z_7i_2 + Z_7i_7; \\
 0 = (Z_{28} + Z_{29} + Z_{30})i_3 + Z_{28}i_4 + (Z_{29} + Z_{30})i_1 + Z_{29}I_w; \\
 0 = (Z_{26} + Z_{27} + Z_{28} + Z_{25})i_4 + (Z_{26} + Z_{27})i_5 - Z_{25}i_1 + Z_{28}i_3; \\
 0 = (Z_{23} + Z_{22} + Z_{13} + Z_{24} + Z_{26} + Z_{27})i_5 + Z_{23}i_{14} + Z_{22}i_{11} + Z_{13}i_6 + Z_{24}i_1 + (Z_{26} + Z_{27})i_4; \\
 0 = (Z_6 + Z_5 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{12} + Z_{13})i_6 + Z_6i_7 + Z_5i_8 + \\
 + (Z_5 + Z_3)(I_{6e1} - I_{6k1} + I_{T1}) + Z_3i_9 + (Z_8 + Z_9)i_9 + Z_{12}i_{10} - Z_{12}I_{CB} + Z_{13}i_5; \\
 0 = (Z_1 + Z_7 + Z_6 + Z_4)i_7 + Z_7i_2 + Z_6i_6 - Z_4i_8; \\
 0 = (Z_4 + Z_5 + Z_2)i_8 - Z_4i_7 + Z_5i_6 + Z_5(I_{6e1} - I_{6k1} + I_{T1}) - Z_2i_9; \\
 0 = (Z_2 + Z_3 + Z_8 + Z_9 + Z_{16} + Z_{17} + Z_{19} + Z_{31})i_9 - Z_2i_8 + Z_3i_6 + \\
 + Z_3(I_{6e1} - I_{6k1} + I_{T1}) + (Z_8 + Z_9)i_6 - Z_{16}i_{12} - Z_{17}I_{PB} - Z_{17}i_{13} + Z_{19}i_{14}; \\
 0 = (Z_{10} + Z_{12} + Z_{11})i_{10} + (Z_{10} - Z_{12} - Z_{11})I_{CB} + (Z_{10} + Z_{11})i_{11} + Z_{12}i_6; \\
 0 = (Z_{10} + Z_{14} + Z_{15} + Z_{18} + Z_{20} + Z_{21} + Z_{22} + Z_{11})i_{11} + (Z_{10} + Z_{11})i_{10} + \\
 + (Z_{10} - Z_{11})I_{CB} + Z_{14}i_{12} + (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20})i_{13} + (Z_{14} + Z_{15})(I_{PB} - I_E) - \\
 - Z_{20}I_{CB} - Z_{21}i_{14} + Z_{22}i_5; \\
 0 = (Z_{14} + Z_{16})i_{12} + Z_{14}i_{11} + Z_{14}(I_{PB} - I_{PC}) - Z_{16}i_9; \\
 0 = (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20} + Z_{17})i_{13} + (Z_{15} + Z_{18} + Z_{20})i_{11} + Z_{15}(I_{PB} - I_{PC}) - \\
 - Z_{20}I_{CB} + Z_{17}I_{PB} - Z_{17}i_9; \\
 0 = (Z_{19} + Z_{23} + Z_{21})i_{14} + Z_{19}i_9 - Z_{21}i_{11} + Z_{23}i_5,
 \end{cases} \tag{1}$$

де $Z_1 = R_1$; $Z_2 = R_{61}$; $Z_3 = -j/(\omega C_{6e1})$; $Z_4 = -j/(\omega C_{6x1})$; $Z_5 = -j/(\omega C_{6k1})$; $Z_6 = R_{k1}$;
 $Z_7 = j\omega L_1$; $Z_8 = R_{e1}$; $Z_9 = R_B$; $Z_{10} = R_{CB}$; $Z_{11} = -j/(\omega C_{3c})$;
 $Z_{12} = \frac{R_{3B}}{1 + \omega^2 R_{3B}^2 C_{3c}^2} - j \frac{\omega R_{3B}^2 C_{3c}}{1 + \omega^2 R_{3B}^2 C_{3c}^2}$; $Z_{13} = R_{31}$; $Z_{14} = -j \frac{1}{\omega C_{PB}}$; $Z_{15} = -j \frac{1}{\omega C_{PC}}$; $Z_{16} = R_n$;
 $Z_{17} = -j/(\omega C_{nc})$; $Z_{18} = R_{CB}$; $Z_{19} = R_c$; $Z_{20} = R_{CB}$; $Z_{21} = \frac{R_{3c}}{1 + \omega^2 R_{3c}^2 C_{3c}^2} - j \frac{\omega R_{3c}^2 C_{3c}}{1 + \omega^2 R_{3c}^2 C_{3c}^2}$;
 $Z_{22} = -j/(\omega C_{3132})$; $Z_{23} = R_{32}$; $Z_{24} = -j/(\omega C_2)$; $Z_{25} = R_3$; $Z_{26} = \frac{R_d}{1 + \omega^2 R_d^2 C_{6ap}^2}$ -
 $-j \frac{\omega R_d^2 C_{6ap}}{1 + \omega^2 R_d^2 C_{6ap}^2}$; $Z_{27} = r_6$; $Z_{28} = -j/(\omega C_3)$; $Z_{29} = -j/(\omega C_w)$; $Z_{30} = R_{RS}$; $Z_{31} = -j/(\omega C_1)$.

На основі системи рівнянь (1) за допомогою програмного пакету Matlab 6.5 розрахована активна та реактивна складові повного опору, теоретичні та експериментальні залежності яких від потужності оптичного випромінювання показані на рис. 4 та 5.

З рис. 4 та 5 випливає, що зі збільшенням оптичної потужності активна складова повного опору зменшується, а реактивна — збільшується.

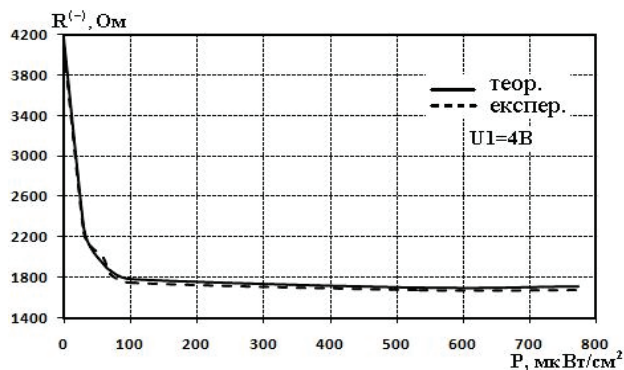


Рис. 4. Залежність активної складової повного опору від оптичної потужності

На рис. 6 подана експериментальна залежність частоти генерації оптичного перетворювача з сонячною батареєю від напруги живлення U_1 .

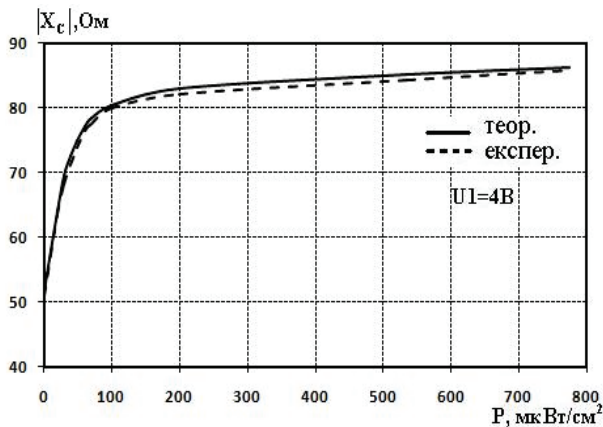


Рис. 5. Залежність реактивної складової повного опору від оптичної потужності

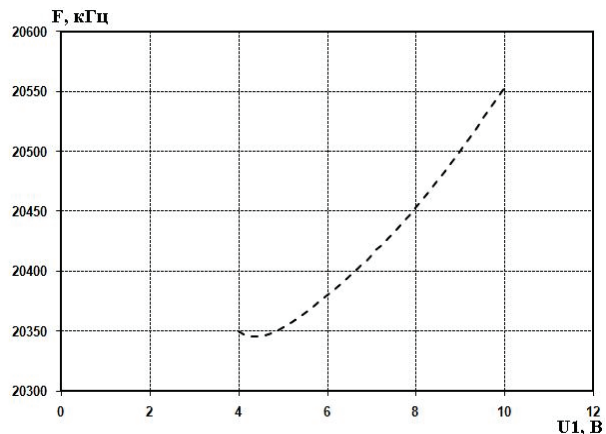


Рис. 6. Експериментальна залежність частоти генерації від напруги живлення

З рис. 6 випливає, що в діапазоні напруги живлення від 4...10 В генератор стабільно генерує, тому режим роботи оптичного перетворювача слід обирати у цьому діапазоні.

На рис. 7 показані результати досліджень сонячної батареї ($U = 7,2$ В, $I = 450$ мА). В діапазоні зміни оптичної потужності від 0 до 774 мкВт/см² напруга на сонячній батареї змінюється в межах 0—6,4 В.

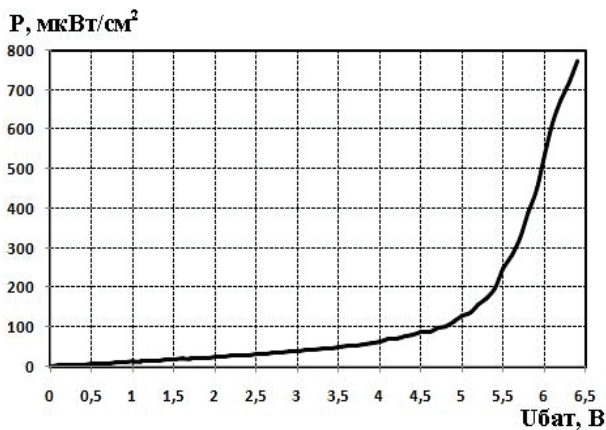


Рис. 7. Залежність вихідної напруги сонячної батареї від оптичної потужності

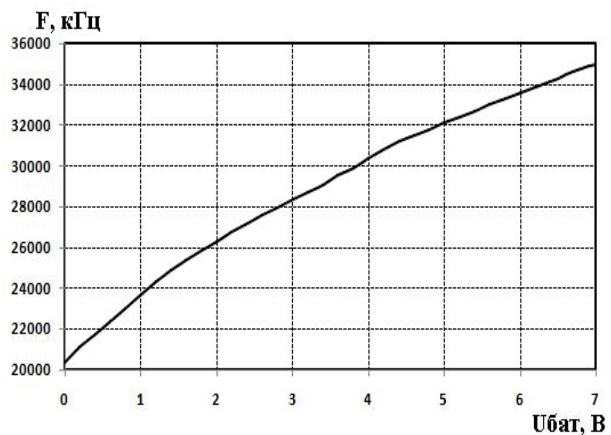


Рис. 8. Залежність частоти генерації перетворювача від вихідної напруги на сонячній батареї ($U_1 = 4$ В)

Проведені дослідження впливу вихідної напруги сонячної батареї на частоту генерації перетворювача показали, що цей вплив відбувається за законом, близьким до лінійного (рис. 8).

Основною характеристикою перетворювача (рис. 1) є функція перетворення, на основі якої мікроконтролерна вимірювальна система визначає значення оптичної потужності. Для визначення функції перетворення необхідно знайти залежність частоти генерації від потужності падаючого випромінювання. Функція перетворення оптичного перетворювача на основі біполярного та двозатворного МДН-транзистора з сонячною батареєю описується виразом

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{D} - (L_1 B - A R_d^2 C_{\text{бар}}^2(P) - B R_d^2 C_{\text{бар}}(P))}{2 L_1 B R_d^2 C_{\text{бар}}^2(P)}}, \quad (2)$$

де $B = C_{\text{бк1}} C_{\text{бел}} C_{\text{зс}} C_w(P) C_{\text{з1з2}}$, $D = (L_1 B - A R_d^2 C_{\text{бар}}^2(P) - B R_d^2 C_{\text{бар}}(P))^2 + 4 A L_1 B R_d^2 C_{\text{бар}}^2(P)$;

$$A = C_{6e1}C_{3c}C_w(P)C_{3132} + C_{6k1}C_{3c}C_w(P)C_{3132} + C_{6k1}C_{6e1}C_w(P)C_{3132} + \\ + C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_w(P) + C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132}.$$

На основі (2) визначена чутливість оптичного перетворювача:

$$S_P^F = \frac{1}{8}\sqrt{2} \left[\left\{ \frac{1}{2}(2D_1 \left(L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132} - 2R_d^2 C_{6ap}(P)A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) - \right. \right. \right. \\ - R_d^2 C_{6ap}^2(P) \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6e1}C_{3c}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{3c}C_{3132} + \right. \\ \left. \left. \left. \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c} \right) - R_d^2 B \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) - \right. \right. \\ - R_d^2 C_{6ap}(P) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132} \left. \right\} + 4L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132} R_d^2 C_{6ap}^2(P)A + \\ + 8L_1 B R_d^2 C_{6ap}(P)A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) + 4L_1 B R_d^2 C_{6ap}^2(P) \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6e1}C_{3c}C_{3132} + \right. \\ \left. \left. \left. \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{3c}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c} \right) \right\} / \sqrt{D_2} - \right. \\ \left. - L_1 \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132} + 2R_d^2 C_{6ap}(P)A \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) + \right. \\ \left. + R_d^2 C_{6ap}^2(P) \left(\left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6e1}C_{3c}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{3c}C_{3132} + \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3132} + \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c} \right) + R_d^2 B \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + R_d^2 C_{6ap}(P) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) C_{6k1}C_{6e1}C_{3c}C_{3132} \right\} / L_1 B R_d^2 C_{6ap}^2(P) - \right. \\ \left. - (\sqrt{D_2} - D_1) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) / L_1 B C_w(P) R_d^2 C_{6ap}^2(P) - \right. \\ \left. - 2(\sqrt{D_2} - D_1) \left(\frac{\partial}{\partial P} C_{6ap}(P) \right) / L_1 B R_d^2 C_{6ap}^3(P) \right] / \pi \sqrt{(\sqrt{D_2} - D_1) / L_1 B R_d^2 C_{6ap}^2(P)}, \quad (3)$$

де $D_1 = L_1 B - R_d^2 C_{6ap}^2(P)A - R_d^2 C_{6ap}(P)B$;

$$D_2 = \left(L_1 B - R_d^2 C_{6ap}^2(P)A - R_d^2 C_{6ap}(P)B \right)^2 + 4L_1 B R_d^2 C_{6ap}^2(P)A.$$

На рис. 9 показані експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації оптичного перетворювача з сонячною батареєю від зміни потужності оптичного випромінювання.

Як випливає з рис. 9, частота генерації збільшується зі збільшенням потужності оптичного випромінювання, а на ділянці від 0 до 80 мкВт/см² спостерігається, що характеристика має більшу крутість. Експериментальні та теоретичні залежності мають задовільну збіжність. Залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання визначається по контуру зворотного струму згідно з еквівалентною схемою (див. рис. 3) на основі теорії стійкості Ляпунова.

Графік залежності чутливості від величини потужності оптичного випромінювання показаний на рис. 10.

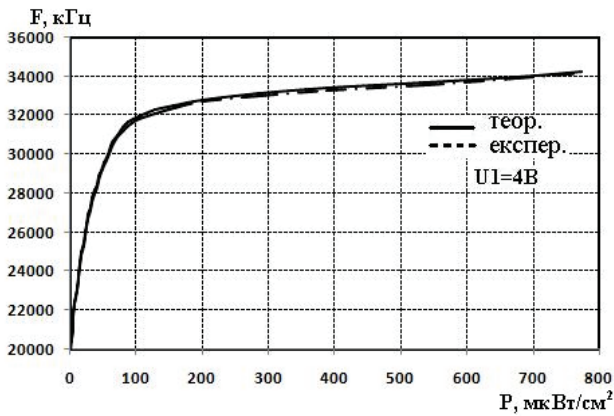


Рис. 9. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача від зміни потужності оптичного випромінювання

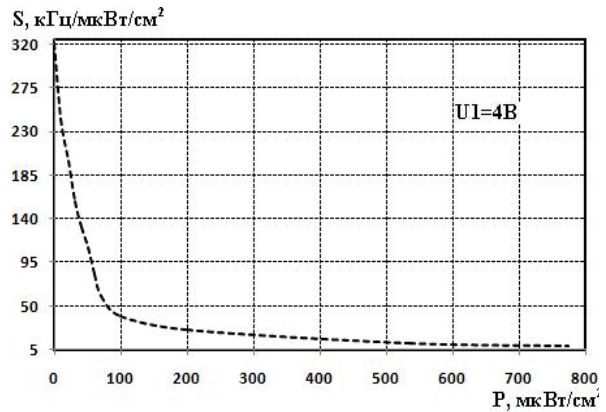


Рис. 10. Залежність чутливості перетворювача від зміни величини потужності оптичного випромінювання

З рис. 10 випливає, що зі зміною потужності оптичного випромінювання від 0 до 774 мкВт/см^2 , чутливість змінюється від 320 до $7,6 \text{ кГц/мкВт/см}^2$.

Висновки

1. Отримано аналітичні вирази, які можуть бути використані для інженерного розрахунку рівняння чутливості і функції перетворення на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного перетворювача на основі біполярного та двозатворного МДН-транзистора та сонячної батареї. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить $\pm 5 \%$.

2. Графічна залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання показує, що ця характеристика має більшу крутість в діапазоні від 0 до 90 мкВт/см^2 , а в діапазоні від 90 до 774 мкВт/см^2 — залежність носить лінійний характер. При цьому чутливість розробленого оптичного перетворювача змінюється від 320 до $7,6 \text{ кГц/мкВт/см}^2$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шалимов Ю. Н. Современная альтернативная энергетика с точки зрения экономики и экологии / [Ю. Н. Шалимов, А. Л. Гусев, Г. А. Мхиторян та ін.] // Альтернативная энергетика и экология. — 2010. — № 10. — С. 114—139.
2. Осадчук В. С. Сучасний оптичний частотний перетворювач на основі сонячної батареї в системі передачі інформації на відстань / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Ільченко О. М. / Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування : матеріали V Міжнар. наук.-техн. конф. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — С. 64—65.
3. Ільченко О. М. Система вимірювання потужності оптичного випромінювання на основі частотних перетворювачів з від'ємним опором / Ільченко О. М., Савчук Б. С. / Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : материалы XV Международного молодежного форума : Сб. материалов форума. — Т. 2. — Харьков : ХНУРЭ, 2011. — С. 95—96.
4. Осадчук В. С. Вимірювання оптичної потужності з можливістю передачі інформації на відстань / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Ільченко, Б. С. Савчук] // Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації : тези доп. III Міжнар. наук.-практ. конф. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — С. 196—197.
5. Ільченко О. М. Радіовимірвальний мікроелектронний перетворювач густини оптичної потужності на основі сонячної батареї / О. М. Ільченко, Б. С. Савчук // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ—2011» : матеріали 7-ї міжнар. молодіжної наук.-техн. конф. — Севастополь : СевНТУ, 2011. — 73 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 20.10.11

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

Осадчук Олександр Володимирович — *завідувач кафедри радіотехніки*.
Вінницький національний технічний університет, Вінниця