

О.В.Осадчук, к.т.н.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
З ФОТОЧУТЛИВИМ ДІОДНИМ ЕЛЕМЕНТОМ**

Вступ

Використання від'ємного опору і реактивних властивостей напівпровідникових приладів дає змогу підвищити чутливість і точність виміру оптичних сигналів завдяки перетворенню їх у частоту [1,2]. Таке перетворення здійснюється на основі генератора, який реалізується у вигляді інтегральної схеми, що складається із польового транзистора з бар'єром Шоткі і біполярного транзистора. В коло зворотного позитивного зв'язку генератора включено фоточутливий діод, на який діє оптичне випромінювання. Таким чином, оптичне випромінювання перетворюється у частотний вихідний сигнал. Для вивчення властивостей таких оптичних перетворювачів необхідно розробити математичну модель, яка дозволяє отримати аналітичні залежності функції перетворення і рівняння чутливості. Розгляду цих питань присвячена дана робота.

Математична модель

Схема оптичного перетворювача подана на рис.1. Для визначення основних параметрів, які характеризують роботу перетворювача, необхідно розрахувати повний опір на електродах колектор-стік оптичного перетворювача згідно еквівалентної схеми (рис.2). Перетворимо її на більш зручну для проведення розрахунків (рис.3).

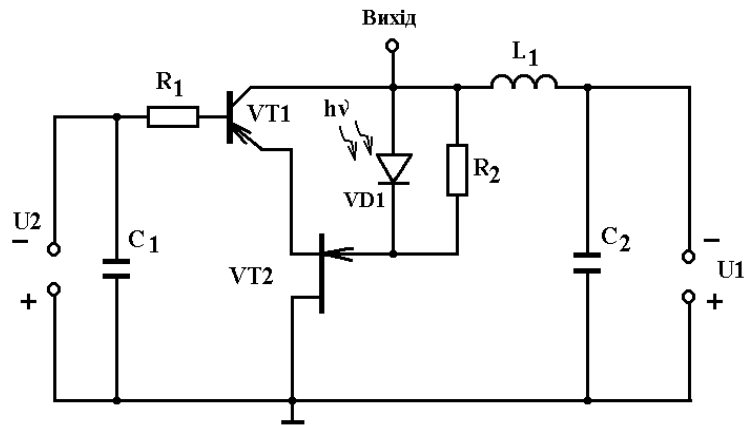


Рис.1. Електрична схема частотного оптичного перетворювача з фотодіодом

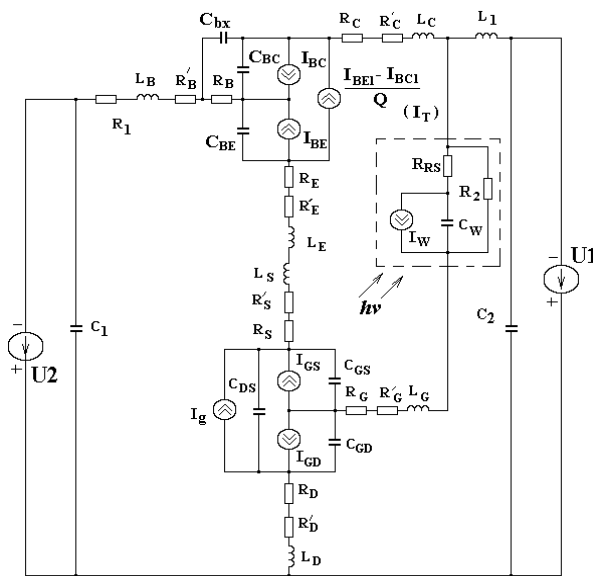


Рис.2. Еквівалентна схема перетворювача

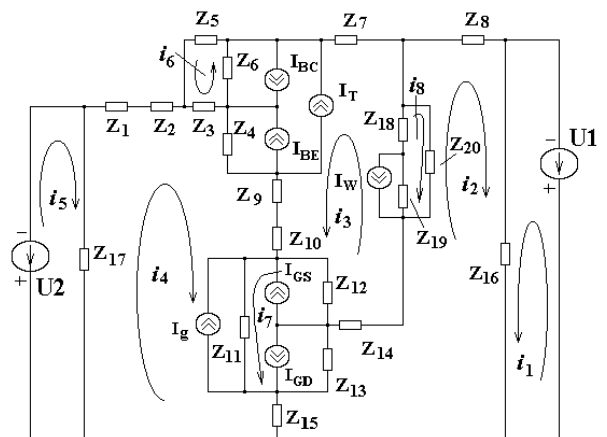


Рис.3. Перетворена еквівалентна схема з фотодіодом

Система рівнянь Кірхгофа для змінного струму має вигляд

$$\left. \begin{aligned}
 U_1 &= Z_{16}(i_1 + i_2), \\
 0 &= (Z_8 + Z_{16} + Z_{15} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{19} + Z_{18})i_2 + Z_{16}i_1 - Z_{15}i_4 + Z_{13}i_7 + \\
 &+ Z_{13}(I_{gd} - I_{gs} - I_g) + Z_{14}i_3 + Z_{19}i_8 + Z_{19}i_3 + Z_{19}I_W + Z_{18}i_3 + Z_{18}i_8, \\
 0 &= (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{15} + Z_{17})i_4 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\
 &+ (Z_9 + Z_{10})i_3 + Z_{11}i_7 + Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) - Z_{15}i_2 - Z_{17}i_5 + Z_3i_6 + Z_4i_3, \\
 0 &= (Z_7 + Z_6 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{14} + Z_{19} + Z_{18})i_3 + Z_6(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + \\
 &+ Z_4i_4 + Z_{18}i_8 + Z_4(-I_{bc} + I_{be} + I_T) + (Z_9 + Z_{10})i_4 + Z_{12}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + \\
 &+ Z_{14}i_2 + Z_{19}i_2 + Z_{19}i_8 + Z_{19}I_W + Z_{18}i_2 - Z_{12}i_7 - Z_6i_6, \\
 U_2 &= Z_{17}(i_5 - i_4), \\
 0 &= (Z_5 + Z_3 + Z_6)i_6 + Z_3i_4 - Z_6i_3 + Z_6(I_{bc} - I_{be} - I_T), \\
 0 &= (Z_{11} + Z_{13} + Z_{12})i_7 + Z_{11}i_4 + Z_{11}(-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + Z_{13}(I_{gd} - I_{gs} - I_g) - \\
 &- Z_{12}i_3 + Z_{12}(I_{gd} - I_{gs} - I_g) + Z_{13}i_2, \\
 0 &= (Z_{20} + Z_{19} + Z_{18})i_8 + Z_{19}i_2 + Z_{19}I_W + Z_{19}i_3 + Z_{18}i_3 + Z_{18}i_2.
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1, & Z_2 &= R'_B + j\omega L_B, & Z_3 &= R_B, & Z_4 &= -j/(\omega C_{BE}), \\
 Z_5 &= -j/(\omega C_{bx}), & Z_6 &= -j/(\omega C_{BC}), & Z_7 &= R_C + R'_C + j\omega L_C, & Z_8 &= j\omega L_1, \\
 Z_9 &= R_E + R'_E + j\omega L_E, & Z_{10} &= R_S + R'_S + j\omega L_S, & Z_{11} &= -j/(\omega C_{DS}), & Z_{12} &= -j/(\omega C_{GS}), \\
 Z_{13} &= -j/(\omega C_{GD}), & Z_{14} &= R_G + R'_G + j\omega L_G, & Z_{15} &= R_D + R'_D + j\omega L_D, & Z_{16} &= -j/(\omega C_2), \\
 Z_{17} &= -j/(\omega C_1), & Z_{18} &= R_{RS}, & Z_{19} &= -j/(\omega C_W), & Z_{20} &= R_2,
 \end{aligned}$$

В еквівалентній схемі використані такі позначення: R'_B, R'_C, R'_E - опір виводів бази, колектора і емітера відповідно; R_B - об'ємний опір бази; R_C - об'ємний опір колектора; R_E - об'ємний опір емітера; C_{BC} - ємність переходу база-колектор; C_{BE} - ємність переходу база-емітер; C_{bx} - ємність між зовнішнім виводом бази і колектора; L_B, L_C, L_E - індуктивність виводів бази, колектора і емітера відповідно, Q - заряд у базі, R_G - об'ємний опір затвору, R_D - об'ємний опір стоку, R_S - об'ємний опір витіку, C_{DS} - ємність витік-стік, C_{GS} - ємність затвор-витік, C_{GD} - ємність затвор-стік, R'_D, R'_G, R'_S - опір виводів стоку, затвору і витіку відповідно, L_S, L_D, L_G - індуктивність виводів витіку, стоку і затвору відповідно L_1 - зовнішня індуктивність.

Введемо позначення, які спрощують запис системи рівнянь (1),

$$\begin{aligned}
 A_2 &= Z_{14} + Z_{19} + Z_{18}, & A_1 &= Z_8 + Z_{16} + Z_{15} + Z_{13} + Z_{14} + Z_{19} + Z_{18}, \\
 A_4 &= Z_4 + Z_9 + Z_{10}, & A_3 &= Z_7 + Z_6 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{12} + Z_{14} + Z_{19} + Z_{18}, \\
 A_5 &= Z_{18} + Z_{19}, & A_6 &= Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_9 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{15} + Z_{17}, \\
 A_7 &= Z_3 + Z_5 + Z_6, & A_8 &= Z_{11} + Z_{13} + Z_{12}, \\
 A_9 &= Z_{19} + Z_{18}, & A_{10} &= Z_{20} + Z_{19} + Z_{18},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= Z_{19} I_W, & Y_{21} &= Z_{13} (I_{gd} - I_{gs} - I_g) + Y_{11}, \\
 Y_{31} &= Z_4 (-I_{bc} + I_{be} + I_T), & Y_{32} &= Z_{12} (-I_{gd} + I_{gs} + I_g) + Y_{11}, \\
 Y_{33} &= Z_6 (-I_{bc} + I_{be} + I_T), & Y_{41} &= Z_4 (-I_{bc} + I_{be} + I_T), \\
 Y_{42} &= Z_{11} (-I_{gd} + I_{gs} + I_g), & Y_{61} &= Z_6 (I_{bc} - I_{be} - I_T), \\
 Y_{71} &= Z_{11} (-I_{gd} + I_{gs} + I_g), & Y_{72} &= Z_{13} (I_{gd} - I_{gs} - I_g), \\
 Y_{73} &= Z_{12} (I_{gd} - I_{gs} - I_g).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Тоді її можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned}
 U_1 &= Z_{16} i_1 + Z_{16} i_2, \\
 -Y_{21} &= Z_{16} i_1 + A_1 i_2 + A_2 i_3 - Z_{15} i_4 + Z_{13} i_7 + Z_{18} i_8, \\
 -Y_{31} - Y_{32} - Y_{33} &= A_2 i_2 + A_3 i_3 + A_4 i_4 - Z_6 i_6 - Z_{12} i_7 + A_5 i_8, \\
 -Y_{41} - Y_{42} &= -Z_{15} i_2 + A_4 i_3 + A_6 i_4 - Z_{17} i_5 - Z_6 i_6 - Z_{11} i_7, \\
 U_2 &= -Z_{17} i_4 + Z_{17} i_5, \\
 -Y_{61} &= -Z_6 i_3 + Z_3 i_4 + A_7 i_6, \\
 -Y_{71} - Y_{72} - Y_{73} &= Z_{13} i_2 - Z_{12} i_3 + Z_{11} i_4 + A_8 i_7, \\
 -Y_{11} &= A_9 i_2 + A_9 i_3 + A_{10} i_8.
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Система рівнянь (3) розв'язується методом Гауса на персональному комп'ютері типу Pentium при використанні пакету програм "Matlab 5.2". Отримавши значення повного опору, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – емнісний характер, розраховується значення еквівалентної ємності, яке залежить від потужності падаючого світла. Еквівалентна ємність перетворювача визначає залежність частоти генерації від потужності діючого світла [3, 4].

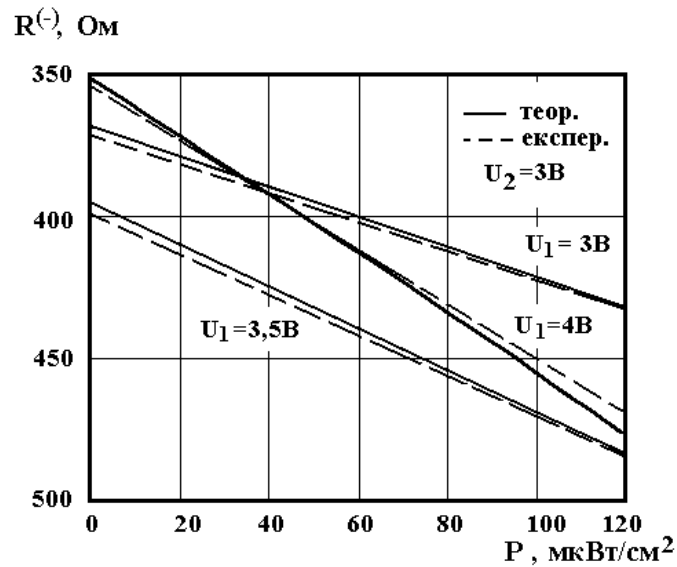


Рис.4. Теоретичні і експериментальні залежності активної складової від потужності оптичного випромінювання

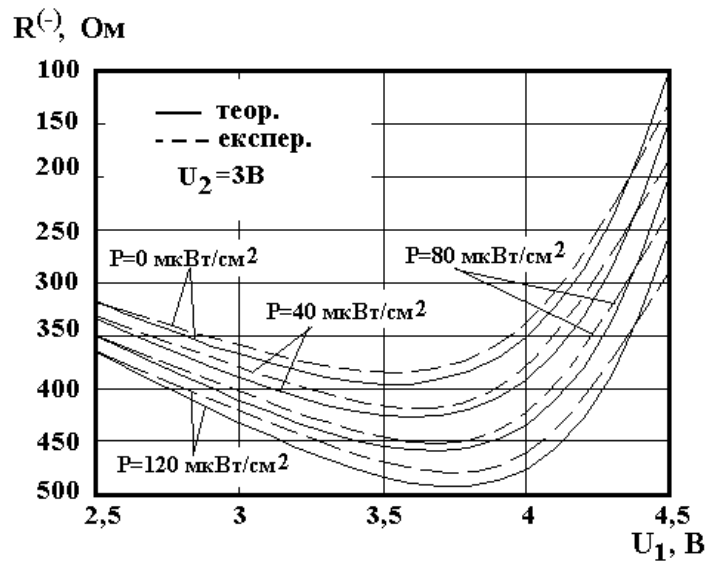


Рис.5. Теоретичні і експериментальні залежності активної складової від напруги живлення при різних значеннях потужності випромінювання

На рис.4 подана теоретична і експериментальна залежність активної складової від потужності оптичного випромінювання. Як видно із графіка, існує значне зростання від'ємного опору із збільшенням потужності падаючого світла від 0 до 120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ при напрузі живлення 4 В. На рис.5 подана залежність від'ємного опору від напруги живлення при різних значеннях потужності випромінювання. Аналіз графіку показує, що з напругою живлення 3,75 В і напругою управління 3 В від'ємний опір має максимальне значення при потужності випромінювання 120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Якщо напруга живлення зростає, більш ніж 3,75 В, активна складова зменшується і в меншій мірі залежить від потужності світлового потоку. На рис.6 подана теоретична і експериментальна залежність реактивної складової повного опору від потужності випромінювання. Як видно із графіка, реактивна складова має емнісний характер і її величина зменшується при зростанні потужності випромінювання. Найбільше зменшення реактивної складової спостерігається з напругою живлення 3 В і зміні потужності випромінювання від 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ до 120 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. На рис.7 подані розрахункова і експериментальна залежності реактивної складової від напруги живлення у темновому режимі і з різними потужностях падаючого світла.

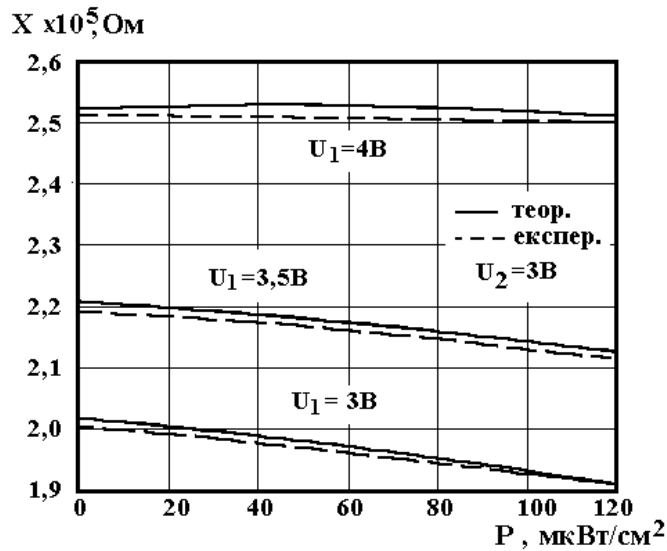


Рис.6. Теоретичні і експериментальні залежності реактивної складової від потужності випромінювання

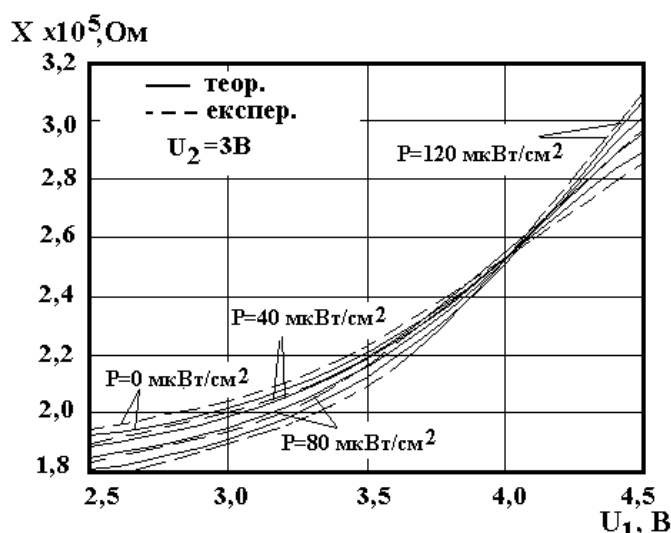


Рис.7. Теоретичні і експериментальні залежності реактивної складової від напруги живлення при різних потужностях випромінювання

Величина реактивної складової визначає величину ємності коливального контуру, тому її неважко визначити, знаючи резонансну частоту і індуктивність контуру. З поданого графіка видно, що зі зростанням напруги живлення у даній структурі фотоперетворювача реактивна складова зростає, проте якщо напруга дорівнює 4,2 В, то вона має найменшу чутливість від потужності випромінювання.

Функція перетворення фоточутливого перетворювача визначається виразом (3).

$$F_0 = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2} \sqrt{B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4LC_{gd}R_d^2(P)C_d^2(P)}}}{\pi LC_{gd}R_d^2(P)C_d^2(P)}, \quad (4)$$

де $B_1 = R_d^2(P)C_d^2(P) + C_{gd}R_d^2(P)C_d(P) - LC_{gd}$.

Рівняння чутливості частотного оптичного перетворювача з фотодіодом визначається з (4)

$$S_P = \frac{1}{8} \sqrt{2} \left(\left(2R_d(P)C_d^2(P) \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right) + 2R_d^2(P)C_d(P) \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right) + 2C_{gd}R_d(P)C_d(P) \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right) + C_{gd}R_d^2(P) \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right) + \frac{1}{2} \left(2A_1 \left(2R_d(P)C_d^2(P) \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right) + 2R_d^2(P)C_d(P) \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right) + 2C_{gd}R_d(P)C_d(P) \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right) + C_{gd}R_d^2(P) \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right) \right) + 8LC_{gd}R_d(P)C_d^2(P) \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right) + 8LC_{gd}R_d^2(P)C_d(P) \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right) \right) / \sqrt{A_2} \right) / (LC_{gd}R_d^2(P)C_d^2(P)) - \frac{2A_3 \left(\frac{\partial R_d(P)}{\partial P} \right)}{LC_{gd}R_d^3(P)C_d^2(P)} - \frac{2A_3 \left(\frac{\partial C_d(P)}{\partial P} \right)}{LC_{gd}R_d^2(P)C_d^3(P)} \right) / \left(\pi \sqrt{\frac{A_3}{LC_{gd}R_d^2(P)C_d^2(P)}} \right) \quad (5)$$

де

$$A_1 = R_d^2(P)C_d^2(P) + C_{gd}R_d^2(P)C_d(P) - LC_{gd},$$

$$A_2 = A_1^2 + 4LC_{gd}R_d^2(P)C_d^2(P),$$

$$A_3 = R_d^2(P)C_d^2(P) + C_{gd}R_d^2(P)C_d(P) - LC_{gd} + \sqrt{A_2}.$$

Теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання подані на рис.8. З графіка видно, що зі зростанням потужності світлового променя від 0 мкВт/см² до 120 мкВт/см² спостерігається зростання частоти генерації від напруги живлення (рис.8 а). Експериментально доведено, що змінюючи режим живлення фоточутливого перетворювача, можна отримати лінійну залежність частоти генерації від потужності оптичного випромінювання. Зі збільшенням потужності оптичного випромінювання частота генерації зменшується, причому найбільша зміна частоти генерації спостерігається з напругами живлення і керування 3 В (рис.8 б). Як видно з графіків розбіжність теоретичних та експериментальних залежностей не перевищує ±5%.

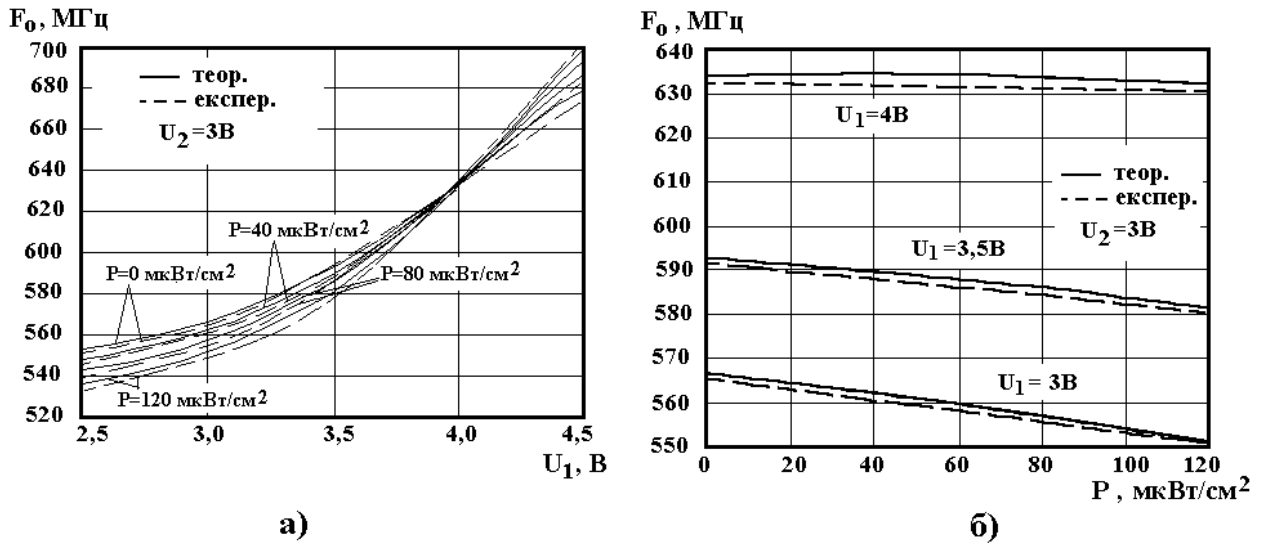


Рис.8.Теоретичні і експериментальні залежності резонансної частоти від напруги живлення (а) і потужності оптичного випромінювання (б)

На рис.9 подані розрахункові і експериментальні залежності вихідної напруги від потужності падаючого світлового потоку, з яких видно, що зі зростанням потужності світлового випромінювання майже лінійно зростає амплітуда змінної напруги. Зі зростанням напруги живлення спостерігається значніша зміна вихідної напруги від потужності світлового потоку.

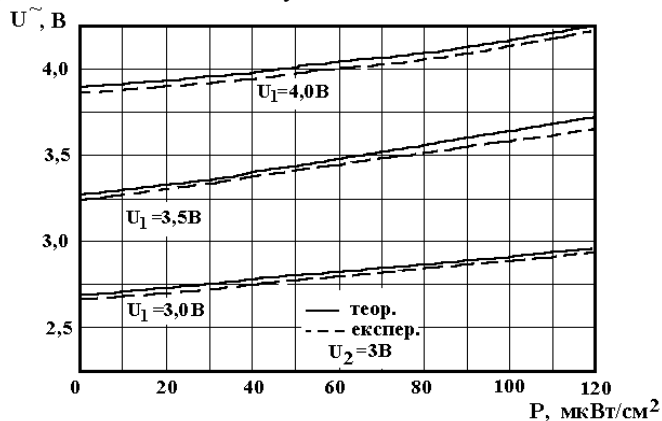


Рис.9.Теоретичні і експериментальні залежності вихідної напруги перетворювача від потужності оптичного випромінювання

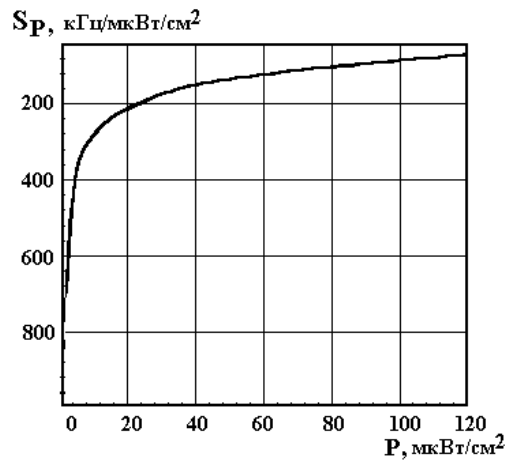


Рис.10.Чутливість оптичного перетворювача з фотодіодом

На рис.10. наведена розрахована згідно (5) залежність чутливості оптичного перетворювача від потужності оптичного випромінювання. Чутливість частотного оптичного перетворювача на частоті 590 МГц складає 200 кГц/мкВт/см².

Висновки

Розроблена математична модель частотного перетворювача, яка складається з польового і біполярного транзисторів та фоточутливого діода, на основі якої отримані аналітичні вирази для функції перетворення і рівняння чутливості. Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку перетворювача з похибкою $\pm 5\%$. Чутливість перетворювача складає 200 кГц/мкВт/см².

Література

1. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. – 303 с.
2. Осадчук А.В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением. –Винница: Континент, 1998. – 130с.
3. Патент Российской Федерации, №2114490, кл. Н01L 31/08. Полупроводниковый оптический датчик / Осадчук В.С., Осадчук Е.В., Осадчук А.В. Бюл.18, 1998.
4. Патент України, №40238 А, по класу Н01L27/14. Мікроелектронний вимірювач освітленості / Осадчук В.С., Осадчук О.В. Бюл.№6, 2001.

Рекомендовано кафедрою електроніки

Осадчук Олександр Володимирович – докторант кафедри електроніки.
Вінницький державний технічний університет