

УДК 681.586.776:621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. В. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. М. Ільченко, асп.

ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ ДВОХ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

Отримано аналітичний вираз вольт-амперної характеристики, що описує роботу радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів, в якому в якості фоточутливого елемента використовується кристал сонячного елемента. Похибка розробленої математичної моделі становить $\pm 5\%$.

Вступ

На сьогоднішній день фотоелектрична енергетика займає особливе місце завдяки здатності фотоелектричних приладів безпосередньо перетворювати сонячне світло в електричні сигнали без шкоди для навколишнього середовища. Виробництво фотоелектричних перетворювачів є однією з найшвидше зростаючих технологій зі щорічним приростом в 40 % [1].

На даний час постала проблема перетворення сонячної енергії в енергію електричного поля, яку потрібно передавати на космічні відстані. Таке перетворення можна зробити з використанням напівпровідникових приладів з від'ємним опором [2]. Тому в статті поставлена задача дослідження характеристики радіовимірювального оптичного перетворювача на основі автогенераторного пристрою, в якому вихідним сигналом є частота.

Метою роботи є визначення вольт-амперної характеристики перетворювача на основі еквівалентної схеми шляхом розв'язку складених рівнянь Кірхгофа, що дає можливість вибрати робочу точку і тим самим досягнути стійкості роботи автогенератора перетворювача.

Визначення вольт-амперної характеристики

Схема радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів з чутливим елементом — кремнієвим сонячним елементом розміром 5×10 мм показана на рис. 1. Еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора утворюється ємнісною складовою повного опору на електродах стік-стік МДН-транзисторів VT1 і VT2. Для визначення вольт-амперної характеристики складено еквівалентну схему за постійним струмом (рис. 2).

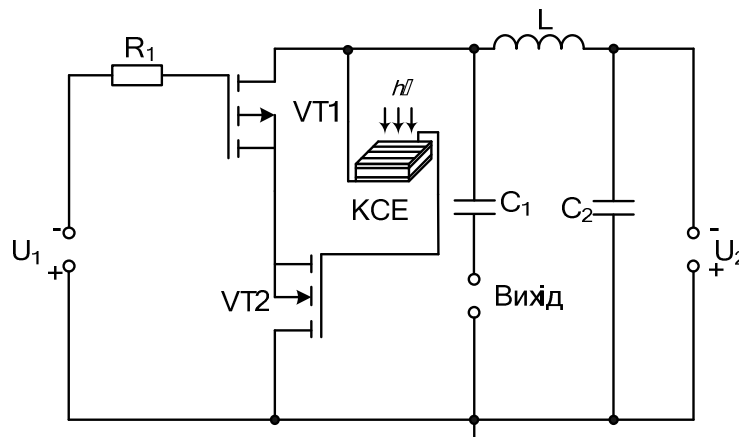


Рис. 1 Схема радіовимірювального оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів: U_1 — напруга керування, U_2 — напруга живлення

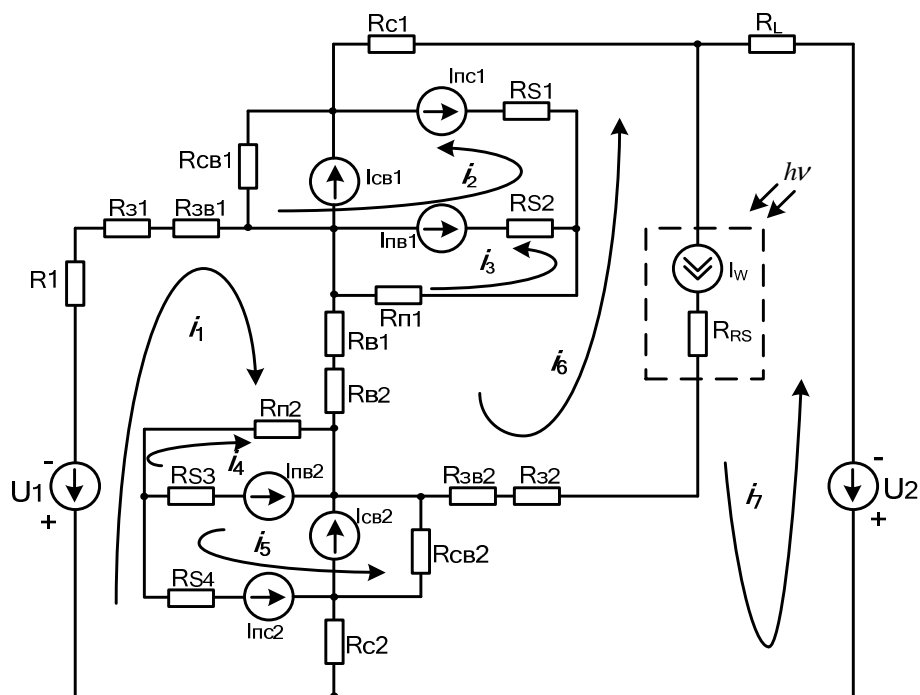


Рис. 2. Еквівалентна схема оптичного перетворювача по постійному струму

Елементи еквівалентної схеми описуються такими величинами: 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; R_L — опір індуктивності коливального контуру; $R_1, R_2, R_3, R_4, R_7, R_6$ — опори ділянки; I_{CB} — струм стік-витік; $I_{пв}$ і $I_{пс}$ — струм переходів підкладка-витік та підкладка-стік.

Струми $I_{пв}$ і $I_{пс}$ в лінійному режимі, якщо виконується умова $U_{CB} < (U_{3B} - U_T)$, визначаються з виразів [3]

$$I_{пв} = I_{ss} (\exp U_{пв} / (N U_t) - 1); \tag{1}$$

$$I_{пс} = I_{ss} (\exp U_{пс} / (N U_t) - 1), \tag{2}$$

де I_{ss} — струм насичення $p-n$ переходу підкладки; $U_{пв}$ — напруга підкладка-витік; $U_{пс}$ — напруга підкладка-стік; N — коефіцієнт неідеальності переходу підкладка-стік; U_t — температурний потенціал $p-n$ переходу.

Статична вихідна характеристика МДН-транзистора в лінійному режимі описується виразом [4]

$$I_{CB} = \frac{\mu C_0 W}{L} \left((U_{3B} - U_T) U_{CB} - \frac{U_{CB}^2}{2} \right), \tag{3}$$

де L — довжина каналу; W — ширина каналу; μ — рухливість носіїв в каналі; C_0 — питома ємність оксиду; U_{3B} — напруга затвор-витік; U_{CB} — напруга стік-витік; U_T — порогова напруга.

Вираз для порогової напруги МДН-транзистора для аналітичних моделей має вигляд [4]

$$U_T = \Phi_{SiO_2} + 2\Phi_B - \frac{Q_S}{C_0} + \frac{1}{C_0} \sqrt{4\epsilon_S q N_A \Phi_B}, \tag{4}$$

де Q_S — питомий поверхневий заряд; Φ/m^2 ; ϵ_S — відносна електрична проникність напівпровідника; N_A — концентрація домішок.

Потенціал Фермі, що входить у вираз (4), описується таким чином:

$$\phi_B = \pm kT/q \cdot \ln(N_A/n_i). \quad (5)$$

Струм стоку в режимі насичення для $U_{CB} \geq (U_{ЗВ} - U_T)$ описується формулою [4]

$$I_{CB_{SAT}} = \frac{\mu C_0 W}{6L} \left((U_{CB_{SAT}} + 2\phi_B)^2 + U_{ЗВ} (U_{CB_{SAT}} + 2\phi_B) - 12\phi_B \left(U_{ЗВ} - \phi_B - \frac{4}{3} K \phi_B^{1/2} \right) \right), \quad (6)$$

де

$$U_{CB_{SAT}} = U_{ЗВ} - 2\phi_B + K^2 \left(1 - \left(1 + 2U_{ЗВ}/K^2 \right)^{1/2} \right), \quad (7)$$

$$K = (\epsilon_s q N_A / C_0)^{1/2}. \quad (8)$$

Опір стік-витік R_{CB} в лінійній області визначається з виразу [4]

$$R_{CB} = \frac{L}{W \mu C_0} (U_{ЗВ} - U_T), \quad (9)$$

а в області насичення

$$R_{e} = \frac{12 \left[L (U_c - U_{CB_{SAT}})^{1/2} - 2(\epsilon_s / q N_A)^{1/2} (U_c - U_{CB_{SAT}}) \right]}{W \mu C_0 (2\epsilon_s / q N_A)^{1/2}} \times \frac{1}{(U_{CB_{SAT}} + 2\phi_B)^2 + U_{ЗВ} (U_{CB_{SAT}} + 2\phi_B) - 12\phi_B (U_{ЗВ} - \phi_B - 4/3 K \phi_B^{1/2})}, \quad (10)$$

де U_c — напруга на стоку; $U_{CB_{SAT}}$ — напруга стік-витік в режимі насичення.

Для схеми на рис. 2 складено систему рівнянь Кірхгофа

$$\begin{cases} -U_1 = (R_1 + R_{31} + R_{3B1} + R_{B1} + R_{B2} + R_{n2} + R_{S4} + R_{C2})(i_1 + I_{пс2}) + (R_{B1} + R_{B2})(i_6 - I_w) - \\ \quad - R_{n2}i_4 + R_{S4}(i_5 + I_{пс2}) + R_{C2}i_7; \\ 0 = (R_{CB1} + R_{S1} + R_{S2})(i_2 - I_{пс1} + I_{CB1} + I_{пБ1}) + R_{S2}(-i_3 + I_{пБ1}) + R_{S1}(-i_6 - I_{пс1} + I_w); \\ 0 = (R_{n1} + R_{S2})(i_3 - I_{пБ1}) + R_{S2}(-i_2 - I_{пБ1}) + R_{n1}(-i_6 + I_w); \\ 0 = (R_{n2} + R_{S3})(i_4 - I_{пБ2}) - R_{n2}i_1 + R_{S3}(i_5 - I_{пБ2}); \\ 0 = (R_{CB2} + R_{S3} + R_{S4})(i_5 + I_{пс2} - I_{CB2} - I_{пБ2}) + R_{CB2}(-i_7 - I_{CB2}) + R_{S4}(i_1 + I_{пс2}) + \\ \quad + R_{S3}(i_4 - I_{пБ2}); \\ 0 = (R_{3B2} + R_{32} + R_{RS} + R_{C1} + R_{S1} + R_{n1} + R_{B1} + R_{B2})(i_6 + I_{пс1} - I_w) - \\ \quad - (R_{3B2} + R_{32} + R_{RS})(i_7 + I_w) + R_{S1}(-i_2 + I_{пс1}) + R_{n1}(-i_3 + I_{пБ1}) + (R_{B1} + R_{B2})i_1; \\ -U_2 = (R_L + R_{RS} + R_{3B2} + R_{32} + R_{CB1} + R_{C2})(i_7 + I_w + I_{CB2}) - \\ \quad - (R_{3B2} + R_{32} + R_{RS})i_6 + R_{CB2}(-i_5 + I_{CB2}) + R_{C2}(i_1 + I_{пс2}). \end{cases} \quad (11)$$

Для спрощення запису системи рівнянь (11) введемо такі позначення:

$$A_1 = R_1 + R_{31} + R_{3B1} + R_{B1} + R_{B2} + R_{n2} + R_{S4} + R_{C2}; \quad A_2 = R_{B1} + R_{B2};$$

$$A_3 = R_{CB1} + R_{S1} + R_{S2}; \quad A_4 = R_{n1} + R_{S2}; \quad A_5 = R_{n2} + R_{S3};$$

$$A_6 = R_{CB2} + R_{S3} + R_{S4}; \quad A_7 = R_{3B2} + R_{32} + R_{RS} + R_{C1} + R_{S1} + R_{n1} + R_{B1} + R_{B2};$$

$$A_8 = R_{3B2} + R_{32} + R_{RS}; \quad A_9 = R_L + R_{RS} + R_{3B2} + R_{32} + R_{CB1} + R_{C2}.$$

Тоді система (11) набуває вигляду :

$$\begin{cases} -U_1 = A_1(i_1 + I_{пс2}) + A_2(i_6 - I_w) - R_{n2}i_4 + R_{S4}(i_5 + I_{пс2}) + R_{c2}i_7; \\ 0 = A_3(i_2 - I_{пс1} + I_{св1} + I_{пб1}) + R_{S2}(-i_3 + I_{пб1}) + R_{S1}(-i_6 - I_{пс1} + I_w); \\ 0 = A_4(i_3 - I_{пб1}) + R_{S2}(-i_2 - I_{пб1}) + R_{n1}(-i_6 + I_w); \\ 0 = A_5(i_4 - I_{пб2}) - R_{n2}i_1 + R_{S3}(i_5 - I_{пб2}); \\ 0 = A_6(i_5 + I_{пс2} - I_{св2} - I_{пб2}) + R_{св2}(-i_7 - I_{св2}) + R_{S4}(i_1 + I_{пс2}) + R_{S3}(i_4 - I_{пб2}); \\ 0 = A_7(i_6 + I_{пс1} - I_w) - A_8(i_7 + I_w) + R_{S1}(-i_2 + I_{пс1}) + R_{n1}(-i_3 + I_{пс1}) + A_2i_1; \\ -U_2 = A_9(i_7 + I_w + I_{св2}) - A_8i_6 + R_{св2}(-i_5 + I_{св2}) + R_{c2}(i_1 + I_{пс2}). \end{cases} \quad (12)$$

У вихідному колі еквівалентної схеми перетворювача по постійному струму протікає струм i_7 , значення якого визначається з останнього рівняння системи (12). Отже, зробивши відповідні підстановки та перетворення, отримаємо аналітичний вираз вольт-амперної характеристики оптичного перетворювача:

$$I_{\text{вих}} = i_7 = \frac{-A_8M_1N_4K_3A_1 - R_{c2}R_{n2}^2A_2M_1N_4 - D_1K_3M_2N_4A_1 + D_2 - D_3 + D_4 + D_5}{-A_9M_2N_4K_3A_1 + A_8M_3N_4K_3A_1 + D_6 + D_7 + D_8 + D_9 + D_{10}}, \quad (13)$$

де $D_1 = -U_2 + A_{16}$; $D_2 = R_{св2}K_3A_1M_2N_1 + R_{св2}K_3A_1M_1N_2$;

$$D_3 = R_{c2}K_3U_1M_2N_4 - R_{c2}K_3A_{10}M_2N_4 + R_{c2}K_3A_2M_1N_4;$$

$$D_4 = R_{c2}R_{n2}K_1M_2N_4 + R_{c2}R_{n2}K_2M_2N_1 + R_{c2}R_{n2}K_2M_1N_2;$$

$$D_5 = R_{c2}R_{S4}K_3M_2N_1 + R_{c2}R_{S4}K_3M_1N_2; \quad D_6 = -R_{св2}M_3N_2K_3A_1 - R_{св2}M_2N_3K_3A_1;$$

$$D_7 = R_{c2}M_3N_4K_3A_2 + R_{c2}R_{n2}^2M_3N_4A_2; \quad D_8 = -R_{c2}R_{n2}M_3N_2K_2 - R_{c2}R_{n2}M_2N_3K_2;$$

$$D_9 = -R_{c2}R_{S4}M_3N_2K_3 - R_{c2}R_{S4}M_2N_3K_3; \quad D_{10} = R_{c2}^2M_2N_4K_3 + R_{c2}^2R_{n2}^2M_2N_4;$$

$$M_1 = N_4K_3(A_3B_2A_{15} + A_1R_{S1}B_2A_{11} + A_1R_{S1}R_{S2}B_1 + A_1A_3R_{n1}B_1 + A_3B_2U_1A_2 - A_3B_2A_2A_{10}) - A_3B_2A_2R_{n2}N_4K_1 - A_3B_2A_2R_{n2}K_2N_1 - K_3A_3B_2A_2R_{S4}N_1;$$

$$M_2 = N_4K_3(A_1A_3B_2A_7 - A_1R_{S1}R_{S2}B_3 - A_1B_2R_{S1}^2 - A_1A_3R_{n1}B_3 - A_3B_2A_2^2) - A_3B_2A_2^2R_{n2}N_4R_{n2} + A_3B_2A_2R_{n2}K_2N_2 + K_3A_3B_2A_2R_{S4}N_2;$$

$$M_3 = N_4K_3A_1A_3B_2A_8 + N_4K_3A_3B_2A_2R_{c2} + A_3B_2A_2R_{n2}K_2N_3 - A_3B_2A_2R_{n2}^2N_4R_{c2} + K_3A_3B_2A_2R_{S4}N_3;$$

$$N_1 = -R_{S3}A_1K_1 + R_{S4}U_1K_3 - R_{S4}A_{10}K_3 - R_{S4}R_{n2}K_1 + A_{14}K_3A_1;$$

$$N_2 = R_{S3}A_1R_{n2}A_2 + R_{S4}A_2K_3 + R_{S4}R_{n2}^2A_2;$$

$$N_3 = R_{S3}A_1R_{n2}R_{c2} + R_{св2}K_3A_1 + R_{S4}R_{n2}^2R_{c2} + R_{S4}R_{c2}K_3;$$

$$N_4 = R_{S4}R_{n2}K_2 + R_{S4}^2K_3 - A_6K_3A_1 + R_{S3}A_1K_2;$$

$$K_1 = A_{13}A_1 - R_{n2}(U_1 - A_{10}); \quad K_2 = R_{n2}R_{S4} + A_1R_{S3}; \quad K_3 = A_1A_5 - R_{n2}^2;$$

$$B_1 = A_{12}A_3 + R_{S2}A_{11}; \quad B_2 = A_3A_4 - R_{S2}^2; \quad B_3 = R_{S2}R_{S1} + A_3R_{n1}.$$

Параметри еквівалентної схеми, необхідні для розрахунку вольт-амперної характеристики, отримані з роботи [3]. На основі аналітичного виразу (13) в пакеті прикладних програм Matlab 5.2 отримано графік ВАХ оптичного перетворювача (рис. 3).

Експериментальні дослідження

У експерименті використовувалась гібридна схема перетворювача на основі двох МДН-транзисторів p -типу КП301Б та n -типу КП305И з конденсатором C , ємність якого 470 нФ. В якості чутливого елемента використано сонячний елемент (5×10 мм) на основі монокристалічного кремнію з ККД 16 %.

На рис. 3 показана теоретична та експериментальна ВАХ пристрою.

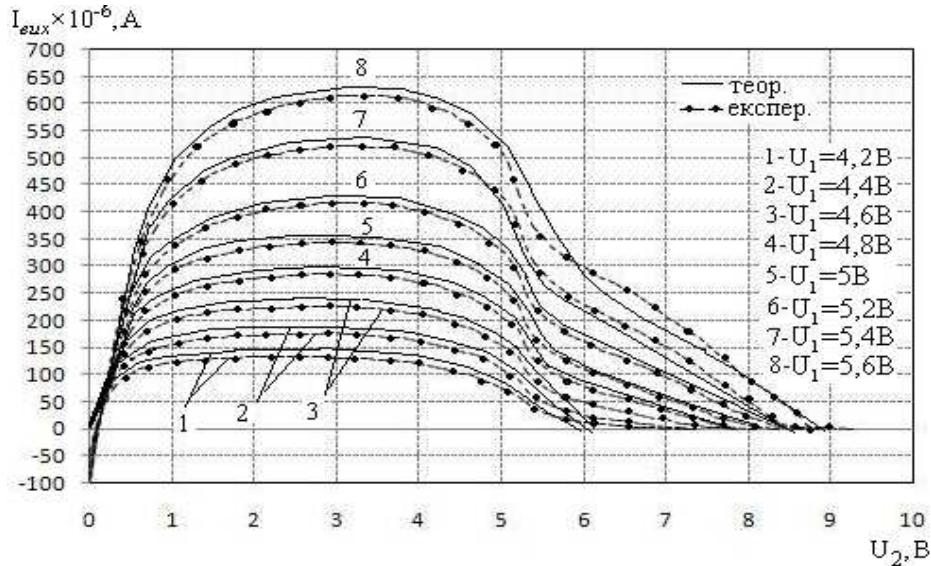


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні ВАХ оптичного перетворювача на основі транзисторів КП301Б та КП305И, та сонячного елемента

Графік показує, що зі збільшенням напруги керування U_1 збільшується ділянка від'ємного опору. Якщо $U_1 = 4,2 \text{ B}$, то ділянка від'ємного опору по U_2 лежить в межах від 3 до 6,5 В, якщо $U_1 = 5 \text{ B}$ — від 3,2 до 8,1 В, якщо $U_1 = 5,6 \text{ B}$ — від 3,5 до 8,9 В.

Висновки

1. Отримано аналітичний вираз вольт-амперної характеристики на основі системи рівнянь Кірхгофа, складених для еквівалентної схеми оптичного перетворювача на основі двох МДН-транзисторів. Розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить $\pm 5 \%$.

2. Графічна залежність вихідного струму $I_{\text{вих}}$ від напруги живлення U_2 доводить, що на електродах стік-стік МДН-транзисторів існує від'ємний опір, причому зі збільшенням напруги керування U_1 збільшується ділянка від'ємного опору. Самозбудження і стійкість роботи автогенератора зумовлені вибором робочої точки на вольт-амперній характеристиці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mathew X. Photovoltaics, Solar Energy Materials // Solar Energy Materials & Solar Cells. — 2009. — № 1 — С. 1.
2. А. В. Осадчук. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: монография / Александр Владимирович Осадчук. — Винница : Континент, 1998. — 130 с.
3. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонентов аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. — М. : Радио и связь, 1992. — 72 с.
4. Ферри Д. Электроника ультрабольших интегральных схем / Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. — М. : Мир, 1991. — 327 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 20.05.10
Рекомендована до друку 29.05.10

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

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