

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621. 382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.;

О. В. Осадчук, д. т. н.;

Л. В. Крилик, к. т. н.

ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГОЧУТЛИВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ОСНОВІ КОМПЛЕМЕНТАРНОЇ МДН-СТРУКТУРИ

Вступ

Визначення вольт-амперної характеристики транзисторного вологочутливого перетворювача є важливим питанням, тому що вибір робочої точки на цій характеристиці обумовлює самозбудження і стійкість роботи автогенератора перетворювача. Одним із методів розрахунку вольт-амперних характеристик напівпровідникових структур з від'ємним опором є метод використання вольт-амперних характеристик складових транзисторів структури і їх впливу одна на одну, проте в цьому методі накладаються певні умови однакового падіння напруги на електродах стік-витік, однакове значення їх порогових напруг тощо, що на практиці не використовується, тому отримані аналітичні вирази є приблизними [1—6]. Метод використання рівнянь Кірхгофа, які складені для еквівалентної схеми перетворювача з постійної напруги, дає можливість отримати досконаліші аналітичні вирази для вольт-амперної характеристики структури, тому що в ньому відсутні вищезгадані обмеження.

Принцип роботи частотного перетворювача вологості базується на зміні ємності вологочутливого МДН-конденсатора на основі аморфного двоокису кремнію, в результаті фізичної та хімічної адсорбції пари води навколишнього середовища.

Визначення вольт-амперної характеристики перетворювача

На рис. 1 [7] подана схема вологочутливого перетворювача, яка складається з комплементарної МДН-структури, живлення якої здійснюють джерела постійної напруги U_1 і U_2 , при цьому вологочутливий конденсатор підключений до другого затвору транзистора VT2.

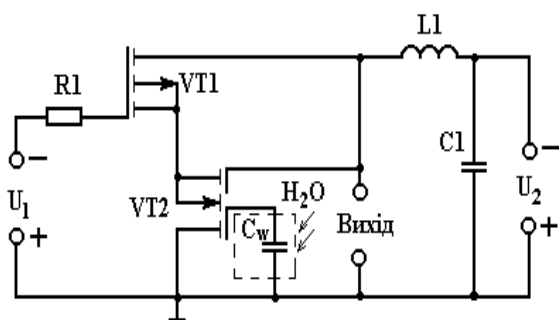


Рис. 1. Схема частотного перетворювача вологості на основі двох МДН-транзисторів

Для визначення вольт-амперної характеристики перетворювача розглядається еквівалентна схема по постійному струму (рис. 2). Визначення аналітичної залежності ВАХ дасть змогу переконатись в існуванні від'ємного опору, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики, та визначить робочу точку пристрою.

Елементи еквівалентної схеми описуються такими величинами: R_1 — навантажувальний опір; R_3 — омичний опір електрода затвора; $R_{ЗВ}$ — опір між електродами затвора і витоку; $R_{СВ}$ — опір стік-витік; R_C — опір р-п переходу стоку; R_B — опір р-п переходу витоку; $R_{П}$ — опір підкладки; $RS1, RS4$ — об'ємні опори р-п переходу підкладка-стік; $RS2, RS3$ —

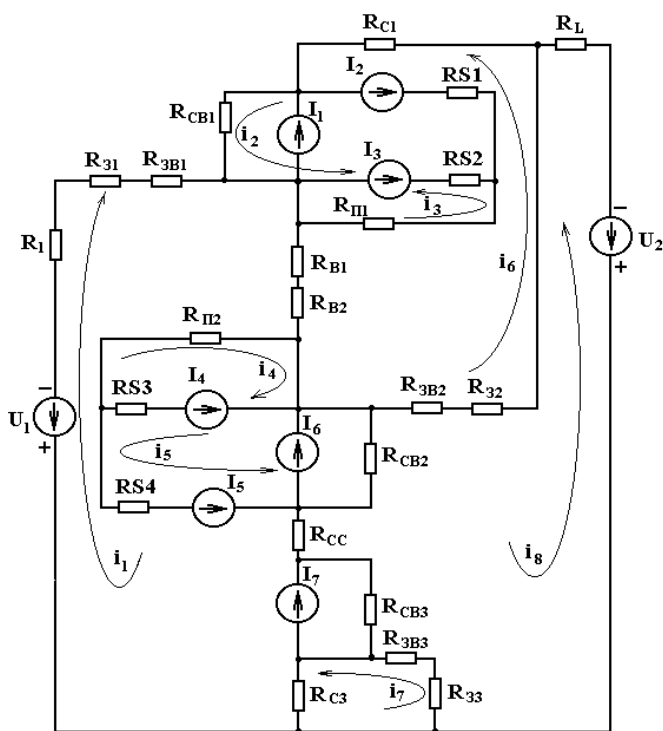


Рис. 2. Еквівалентна схема перетворювача по постійному струму транзистора; λ — коефіцієнт модуляції довжини каналу з розмірністю 1/В; U_{CB} — напруга стік-витік, а режиму насичення ($0 \leq U_{ЗВ} - U_{пор} \leq U_{CB}$) [8] —

$$I_1 = \beta(\lambda + \lambda^2 U_{CB}) U_{CB} [2(U_{ЗВ} - U_{пор}) - U_{CB}]. \quad (2)$$

Лінійний режим роботи виконується за умови $U_{CB} < (U_{ЗВ} - U_{пор})$, причому [8]

$$I_2 = I_5 = I_{нас} [\exp(U_{ПС}/(NU_T)) - 1]; \quad (3)$$

$$I_3 = I_4 = I_{нас} [\exp(U_{ПВ}/(NU_T)) - 1], \quad (4)$$

де $I_{нас}$ — струм насичення $p-n$ переходу підкладки; $U_{ПС}$ — напруга підкладка-стік; $U_{ПВ}$ — напруга підкладка-витік; N — коефіцієнт неідеальності переходу підкладка-стік; $U_T = kT/q$ — температурний потенціал $p-n$ переходу.

Опір стік-витік R_{CB} для МДН-транзистора, який знаходиться в лінійній області вольт-амперної характеристики, визначається виразом [9]

$$R_{CB} = \frac{L}{W\mu C_o} (U_{ЗВ} - U_T), \quad (5)$$

а для області насичення характерний наступний вираз [9]

$$R_{CB} = \frac{12 \left[L(U_C - U_{CBнас})^{1/2} - 2(\epsilon_{НП}/qN_A)^{1/2} (U_C - U_{CBнас}) \right]}{W\mu C_o (2\epsilon_{НП}/qN_A)^{1/2}} \times \frac{1}{\left[(U_{CBнас} + 2\phi_B)^2 + U_{ЗВ}(U_{CBнас} + 2\phi_B) - 12\phi_B(U_{ЗВ} - \phi_B - 4/3k\phi_B^{1/2}) \right]}, \quad (6)$$

де L — довжина каналу; W — ширина каналу; μ — рухливість носіїв в каналі; C_o — питома ємність

об'ємні опори $p-n$ переходу підкладка-витік; R_L — опір індуктивності коливального контуру; R_{CC} — загальний опір стоку-витоку другого затвору двозатворного транзистора VT2; I_1, I_6, I_7 — струми стоку-витоку; I_2, I_5 — струми переходів підкладка-стік; I_3, I_4 — струми переходів підкладка-витік.

Струми стоку-витоку I_1, I_6, I_7 визначаються загально прийнятим рівнянням ($I_1 = I_6 = I_7$), причому режиму відсічки ($(U_{ЗВ} - U_{пор}) < 0$) відповідає [8]

$$I_1 = \beta(\lambda + \lambda^2 U_C)$$

де $U_{ЗВ}$ — напруга затвор-витік; $U_{пор}$ — порогова напруга; β — крутизна прохідної характеристики МДН-

окису; U_C — напруга на стокові; $U_{CBнас}$ — напруга стік-витік в режимі насичення; N_A — концентрація домішок. Потенціал Фермі φ_B описується таким чином [9]:

$$\varphi_B = \pm kT/q \ln(N_A/n_i). \quad (7)$$

Рівняння Кірхгофа, згідно напрямкам вибраних контурних струмів, набувають вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} -U_1 = (R_1 + R_{31} + R_{3B1} + R_{B1} + R_{B2} + R_{\Pi2} + RS4 + R_{CC} + R_{CB3} + R_{C3})(i_1 + I_5 + I_7) + \\ \quad + (R_{B1} + R_{B2})i_6 - R_{\Pi2}i_4 + RS4(i_5 + I_5) + R_{CC}i_8 + R_{CB3}(i_8 + I_7) + R_{C3}i_7; \\ 0 = (i_2 - I_2 + I_1 + I_3)(RS2 + R_{CB1} + RS1) + RS2(-i_3 + I_3) + RS1(-i_6 - I_2); \\ 0 = (i_3 - I_3)(R_{\Pi1} + RS2) + RS2(-i_2 - I_3) - R_{\Pi1}i_6; \\ 0 = (i_4 - I_4)(R_{\Pi2} + RS3) - R_{\Pi2}i_1 + RS3(i_5 - I_4); \\ 0 = (i_5 + I_5 - I_6 - I_4)(R_{CB2} + RS4 + RS3) + R_{CB2}(-i_8 - I_6) + RS4(i_1 + I_5) + \\ \quad + RS3(i_4 - I_4); \\ 0 = (i_6 + I_2)(R_{3B2} + R_{32} + R_{C1} + RS1 + R_{\Pi1} + R_{B1} + R_{B2}) - (R_{3B2} + R_{32})i_8 + \\ \quad + RS1(-i_2 + I_2) - R_{\Pi1}i_3 + (R_{B1} + R_{B2})i_1; \\ 0 = (R_{C3} + R_{33} + R_{3B3})i_7 + R_{C3}i_1 - (R_{3B3} + R_{33})i_8; \\ -U_2 = (R_L + R_{32} + R_{3B2} + R_{CB2} + R_{CC} + R_{CB3} + R_{3B3} + R_{33})(i_8 + I_6 + I_7) - \\ \quad - (R_{3B2} + R_{32})i_6 + R_{CB2}(-i_5 + I_6) + R_{CC}i_1 + R_{CB3}(i_1 + I_7) - (R_{3B3} + R_{33})i_7. \end{array} \right. \quad (8)$$

Для спрощення запису системи рівняння (8) введемо позначення:

$$\begin{aligned} A_1 &= R_1 + R_{31} + R_{3B1} + R_{B1} + R_{B2} + R_{\Pi2} + RS4 + R_{CC} + R_{CB3} + R_{C3}; \quad A_2 = R_{B1} + R_{B2}; \\ A_3 &= RS2 + R_{CB1} + RS1; \quad A_4 = R_{\Pi1} + RS2; \quad A_5 = R_{\Pi2} + RS3; \quad A_6 = R_{CB2} + RS4 + RS3; \\ A_7 &= R_{3B2} + R_{32} + R_{C1} + RS1 + R_{\Pi1} + R_{B1} + R_{B2}; \quad A_8 = R_{3B2} + R_{32}; \quad A_9 = R_{C3} + R_{33} + R_{3B3}; \\ A_{10} &= R_{3B3} + R_{33}; \quad A_{11} = R_L + R_{32} + R_{3B2} + R_{CB2} + R_{CC} + R_{CB3} + R_{3B3} + R_{33}; \\ A_{12} &= -A_1(I_5 + I_7) - RS4I_5 - R_{CB3}I_7; \quad A_{13} = -A_3(-I_2 + I_1 + I_3) + RS1I_2 - RS2I_3; \\ A_{14} &= (A_4 + RS2)I_3; \quad A_{15} = (A_5 + RS3)I_4; \quad A_{16} = -A_6(-I_4 + I_5 - I_6) + RS3I_4 - RS4I_5 + R_{CB2}I_6; \\ A_{17} &= -A_7I_2 - RS1I_2; \quad A_{18} = -A_{11}(I_6 + I_7) - R_{CB2}I_6 - R_{CB3}I_7. \end{aligned}$$

З використанням введених позначень система рівнянь (8) приймає вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} -U_1 + A_{12} = A_1i_1 + A_2i_6 - R_{\Pi2}i_4 + RS4i_5 + R_{CC}i_8 + R_{CB3}i_8 + R_{C3}i_7; \\ A_{13} = A_3i_2 - RS2i_3 - RS1i_6; \\ A_{14} = A_4i_3 - RS2i_2 - R_{\Pi1}i_6; \\ A_{15} = A_5i_4 - R_{\Pi2}i_1 + RS3i_5; \\ A_{16} = A_6i_5 - R_{CB2}i_8 + RS4i_1 + RS3i_4; \\ A_{17} = A_7i_6 - RS1i_2 - R_{\Pi1}i_3 + A_2i_1 - A_8i_8; \\ 0 = A_9i_7 + R_{C3}i_1 - A_{10}i_8; \\ -U_2 + A_{18} = A_{11}i_8 - A_8i_6 - R_{CB2}i_5 + R_{CC}i_1 + R_{CB3}i_1 - A_{10}i_7. \end{array} \right. \quad (9)$$

Значення струму i_1 знаходимо з першого рівняння системи (9)

$$i_1 = -\frac{B_1 + R_{C3}i_7 - R_{\Pi2}i_4 + RS4i_5 + A_2i_6 + i_8B_2}{A_1}, \quad (10)$$

де $B_1 = U_1 - A_{12}$, $B_2 = R_{CC} + R_{CB3}$.

З другого рівняння системи (9) визначаємо значення струму i_2 :

$$i_2 = \frac{A_{13} + RS2i_3 + RS1i_6}{A_3}. \quad (11)$$

З третього рівняння системи (9) з урахуванням (11) визначимо значення струму i_3 :

$$i_3 = \frac{B_5 + B_3 i_6}{B_4}, \quad (12)$$

де $B_3 = RS2 \cdot RS1 + R_{\Pi 1} A_3$; $B_4 = A_4 A_3 - RS2^2$; $B_5 = A_{14} A_3 + RS2 A_{13}$.

Значення струму i_4 визначимо з четвертого рівняння системи (9) з урахуванням значення струму i_1 (10):

$$i_4 = -\frac{K_1 + R_{\Pi 2} R_{C3} i_7 + R_{\Pi 2} B_2 i_8 + K_4 i_5 + R_{\Pi 2} A_2 i_6}{K_2}, \quad (13)$$

де $K_1 = -A_{15} A_1 + R_{\Pi 2} B_1$; $K_2 = -R_{\Pi 2}^2 + A_5 A_1$; $K_4 = R_{\Pi 2} RS4 + RS3 A_1$.

Значення струму i_5 визначимо з п'ятого рівняння системи (9) з урахуванням (10) та (13):

$$i_5 = -\frac{N_1 + N_2 i_6 + N_3 i_7 + N_4 i_8}{N_5}, \quad (14)$$

де $N_1 = A_6 K_2 A_1 + RS4 B_1 K_2 + RS4 R_{\Pi 2} K_1 + RS3 A_1 K_1$,

$N_2 = RS4 R_{\Pi 2}^2 A_2 + RS4 A_2 K_2 + RS3 A_1 R_{\Pi 2} A_2$,

$N_3 = RS4 R_{C3} K_2 + RS4 R_{\Pi 2}^2 R_{C3} + RS3 A_1 R_{\Pi 2} R_{C3}$,

$N_4 = RS4 R_{\Pi 2}^2 B_2 + RS4 B_2 K_2 + R_{CB2} K_2 A_1 + RS3 A_1 R_{\Pi 2} B_2$,

$N_5 = RS3 K_4 A_1 - A_6 K_2 A_1 + RS4 R_{\Pi 2} K_4 + RS4^2 K_2$.

Враховуючи (10), (11), (12), (13), (14) з шостого рівняння системи (9) визначимо значення струму i_6

$$i_6 = -\frac{M_1 + M_2 i_7 + M_3 i_8}{M_4}, \quad (15)$$

де $M_1 = A_7 N_5 K_2 A_1 B_4 A_3 + A_2 B_4 A_3 B_1 N_5 K_2 + A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2} K_1 N_5 - A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2} K_4 N_1 -$
 $- A_2 B_4 A_3 RS4 K_2 N_1 + RS1 N_5 K_2 A_1 A_{13} B_4 + RS1 N_5 K_2 A_1 RS2 B_5 + R_{\Pi 1} B_5 N_5 K_2 A_1 A_3$;

$M_2 = A_2 B_4 A_3 R_{C3} N_5 K_2 + A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2}^2 R_{C3} N_5 - A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2} K_4 N_3 - A_2 B_4 A_3 RS4 K_2 N_3$;

$M_3 = A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2}^2 B_2 N_5 - A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2} K_4 N_4 + A_2 B_4 A_3 B_2 N_5 K_2 - A_2 B_4 A_3 RS4 K_2 N_4 +$
 $+ A_8 N_5 K_2 A_1 B_4 A_3$;

$M_4 = -A_2 B_4 A_3 RS4 N_2 K_2 + A_2^2 B_4 A_3 N_5 K_2 - A_2 B_4 A_3 R_{\Pi 2} K_4 N_2 + A_2^2 B_4 A_3 R_{\Pi 2}^2 N_5 +$
 $+ R_{\Pi 1} B_3 N_5 K_2 A_1 A_3 - A_7 N_5 K_2 A_1 B_4 A_3 + RS1 N_5 K_2 A_1 RS2 B_3 + RS1^2 N_5 K_2 A_1 B_4$.

Значення струму i_7 визначимо з сьомого рівняння системи (9) врахувавши (10), (11), (12), (13), (14), (15)

$$i_7 = \frac{P_1 + P_2 i_8}{P_3}, \quad (16)$$

де $P_1 = R_{C3} B_1 M_4 N_5 K_2 + R_{C3} R_{\Pi 2} K_1 M_4 N_5 - R_{C3} R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_1 - R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_1 M_4 +$
 $+ R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_1 - R_{C3} RS4 K_2 N_1 M_4 + R_{C3} RS4 K_2 N_2 M_1 - R_{C3} A_2 N_5 K_2 M_1$;

$P_2 = -R_{C3} R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_3 + R_{C3} R_{\Pi 2}^2 B_2 M_4 N_5 + R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_3 - R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_4 M_4 +$
 $+ R_{C3} RS4 K_2 N_2 M_3 - R_{C3} RS4 K_2 N_4 M_4 - R_{C3} A_2 N_5 K_2 M_3 + R_{C3} B_2 M_4 N_5 K_2 + A_{10} M_4 N_5 K_2 A_1$;

$P_3 = -R_{C3}^2 M_4 N_5 K_2 - R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_2 + R_{C3} R_{\Pi 2} K_4 N_3 M_4 - R_{\Pi 2}^2 R_{C3}^2 M_4 N_5 +$
 $+ R_{C3} R_{\Pi 2}^2 A_2 M_2 N_5 - R_{C3} RS4 K_2 N_2 M_2 + R_{C3} RS4 K_2 N_3 M_4 + R_{C3} A_2 M_2 N_5 K_2 + A_9 M_4 N_5 K_2 A_1$.

З останнього рівняння системи (9), використовуючи (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16) розраховуємо значення струму i_8 , який протікає у вихідному колі еквівалентної схеми перетворювача по

постійному струму (рис. 2), тобто:

$$i_{\text{вих}} = i_8 = \frac{U_2 P_3 M_4 N_5 K_2 A_1 + B_2 R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_1 P_3 + B_2 R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_2 P_1 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5}{B_2 R_{C3} P_2 M_4 N_5 K_2 + R_{\Pi 2}^2 B_2^2 P_3 M_4 N_5 + D_{10} + D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{14} + D_{15}} - \left(\frac{A_{18} P_3 M_4 N_5 K_2 A_1 + A_{10} P_1 M_4 N_5 K_2 A_1 + B_2 B_1 P_3 M_4 N_5 K_2 + D_6 + D_7 + D_8 + D_9}{B_2 R_{C3} P_2 M_4 N_5 K_2 + R_{\Pi 2}^2 B_2^2 P_3 M_4 N_5 + D_{10} + D_{11} + D_{12} + D_{13} + D_{14} + D_{15}} \right), \quad (17)$$

де $D_1 = B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_1 P_3 M_4 + B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_3 M_4$; $D_2 = B_2 R S 4 K_2 N_1 P_3 M_4 + B_2 R S 4 K_2 N_3 P_1 M_4$;

$D_3 = B_2 A_2 N_5 K_2 M_1 P_3 + B_2 A_2 N_5 K_2 M_2 P_1$; $D_4 = R_{C B 2} K_2 A_1 N_1 P_3 M_4 + R_{C B 2} K_2 A_1 N_3 P_1 M_4$;

$D_5 = A_8 N_5 K_2 A_1 M_1 P_3 + A_8 N_5 K_2 A_1 M_2 P_1$;

$D_6 = B_2 R_{\Pi 2} K_1 P_3 M_4 N_5 + B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_1 P_3 + B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_2 P_1$;

$D_7 = B_2 R_{\Pi 2}^2 R_{C3} P_1 M_4 N_5 + B_2 R_{C3} P_1 M_4 N_5 K_2$; $D_8 = B_2 R S 4 K_2 N_2 M_1 P_3 + B_2 R S 4 K_2 N_2 M_2 P_1$;

$D_9 = R_{C B 2} K_2 A_1 N_2 M_1 P_3 + R_{C B 2} K_2 A_1 N_2 M_2 P_1$;

$D_{10} = B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_2 P_2 + B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_2 M_3 P_3 - B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_3 P_2 M_4 - B_2 R_{\Pi 2} K_4 N_4 P_3 M_4$;

$D_{11} = B_2 R_{\Pi 2}^2 R_{C3} P_2 M_4 N_5 - B_2 R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_2 P_2 - B_2 R_{\Pi 2}^2 A_2 N_5 M_3 P_3$;

$D_{12} = B_2 R S 4 K_2 N_2 M_2 P_2 + B_2 R S 4 K_2 N_2 M_3 P_3 - B_2 R S 4 K_2 N_3 P_2 M_4 - B_2 R S 4 K_2 N_4 P_3 M_4$

$D_{13} = -B_2 A_2 N_5 K_2 M_2 P_2 - B_2 A_2 N_5 K_2 M_3 P_3 + B_2^2 P_3 M_4 N_5 K_2$;

$D_{14} = R_{C B 2} K_2 A_1 N_2 M_2 P_2 + R_{C B 2} K_2 A_1 N_2 M_3 P_3 - R_{C B 2} K_2 A_1 N_3 P_2 M_4 - R_{C B 2} K_2 A_1 N_4 P_3 M_4$;

$D_{15} = -A_8 N_5 K_2 A_1 M_2 P_2 - A_8 N_5 K_2 A_1 M_3 P_3 + A_{10} P_2 M_4 N_5 K_2 A_1 - A_{11} P_3 M_4 N_5 K_2 A_1$.

Параметри еквівалентної схеми перетворювача, необхідні для розрахунку вольт-амперної характеристики, отримані з роботи [8].

Експериментальні дослідження

Експериментальна установка подана на рис. 3. Під час проведення експерименту використовувались джерела постійної напруги (ДПН) типу ВИП009, міліамперметр типу В7-35, вольтметр типу В7-35, значення параметрів схеми: $R_1 = 1$ кОм, опір індуктивності L складав 14,72 Ом, $C_1 = 470$ нФ.

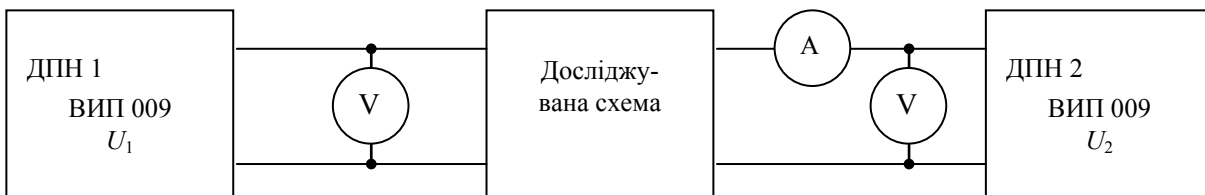


Рис. 3. Блок-схема вимірювальної установки

Згідно виразу (17) розрахована вольт-амперна характеристика частотного перетворювача вологості. На рис. 4 подана теоретична та експериментальна ВАХ пристрою вологості на основі комплементарної МДН-структури (BSH 201 та BF 998). З графіка видно, що зі збільшенням напруги керування U_1 збільшується ділянка від'ємного опору. Так, якщо $U_1 = 2,5$ В, то ділянка від'ємного опору по U_2 лежить від 0,7 до 1,2 В, якщо $U_1 = 4$ В — від 1,8 до 2,8 В, а якщо $U_1 = 5,5$ В, то вона становить від 3,25 до 4,8 В.

На рис. 5 подані експериментальні ВАХ частотного перетворювача вологості на основі комплементарної МДН-структури (КП 301 В та КП 327 АИ).

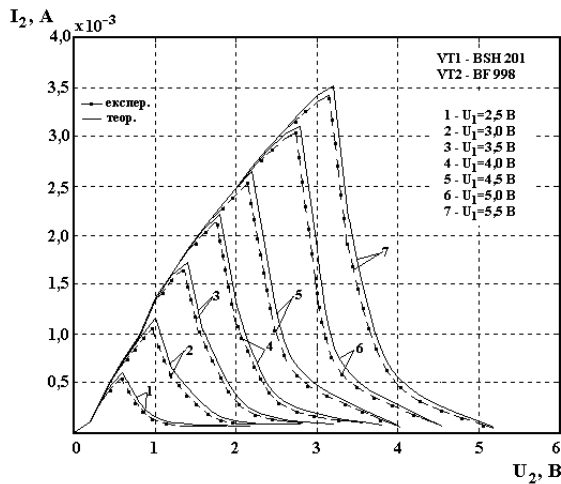


Рис. 4. Експериментальні та теоретичні ВАХ частотного перетворювача вологості на основі транзисторів BSH 201 і BF 998

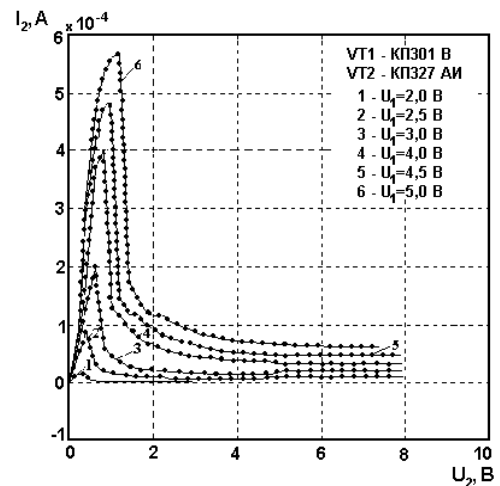


Рис. 5. Експериментальні ВАХ частотного перетворювача вологості на основі транзисторів КП 301 В і КП 327 АИ

З рис. 5 видно, що зі збільшенням напруги керування U_1 збільшується ділянка від'ємного опору, тобто при $U_1 = 2$ В, то ділянка від'ємного опору по U_2 лежить від 0,4 до 0,5 В, якщо $U_1 = 3$ В — від 0,6 до 1,8 В, а якщо $U_1 = 5$ В, — то від 1,25 до 3,8 В.

Висновки

Отримано аналітичний вираз вольт-амперної характеристики частотного перетворювача вологості на основі системи рівнянь Кірхгофа, що описують поведінку комплементарної МДН-структури, згідно їх еквівалентних схем по постійному струму. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів показало, що їх розбіг становить 3 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Како Г., Ивада Х., Токоли Х., Терамото И. Лямбда-диод многофункциональный прибор с отрицательным сопротивлением // Электроника. — 1975. — № 13. — С. 48—53.
2. Iprì A. C. Lambda diode utilizing an enhancementdepletion CMOS/SOS process. // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-24. — 1977. — №6. — P. 751—756.
3. Baliga V. J. An improved GAMBIT device structure. // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-25. — 1978. — № 2. — P. 1411—1412.
4. Brezeanu C., Petr M. Dioda lamda-characteristici statice si aplicatic // EEA-Automatica si electronica, vol.30. — 1986. — № 2. — P. 57—60.
5. Кічак В. М., Осадчук О. В. Математичні моделі перетворювачів на базі транзисторних структур з від'ємним опором // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1994. — № 4(5). — С. 44—47.
6. Гаряинов С. Ф., Серьезнов А. И., Степанова Л. Н., Филинюк Н. А. Негатроника. — Новосибирск: Наука, 1995. — 320 с.
7. Пат. 46385 А Україна, МКІ G 01 N 27/12. Вимірювач вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик (Україна). — № 2001074689; Заявлено 05.07.2001. Опубл. 15.05.2002. Бюл. № 5.
8. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств. Designlab 8.0. — М.: Салон-Р, 2000. — 698 с.
9. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Том 1. — М.: Мир, 1984. — 456 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 24.12.02
Рекомендована до друку 03.09.04

Осадчук Володимир Степанович — завідувач кафедри, **Крилик Людмила Вікторівна** — старший викладач.

Кафедра електроніки;

Осадчук Олександр Володимирович — завідувач кафедри радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет