

## ПОБУДОВА СТАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ ЕНЕРГОДИНАМІЧНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ

*Розглядається статична модель транзистора для енергодинамічного методу діагностування. Дана модель являється основою для розробки алгоритму побудови статичних моделей різних типів транзисторів з метою визначення їх діагностичних параметрів.*

*Ключові слова: статична модель, енергодинамічний метод.*

*Рассматривается статическая модель транзистора для энергодинамического метода диагностирования. Данная модель является основой для разработки алгоритма построения статических моделей разных типов транзисторов с целью определения их диагностических параметров.*

*Ключевые слова: статическая модель, энергодинамический метод.*

*The static model of the transistor for a power dynamic method of diagnosing is considered. This model is a basis for development of algorithm of creation of static models of different types of transistors for the purpose of determination of their diagnostic parameters.*

*Keywords: static model, power dynamic method.*

**Вступ.** Сучасні об'єкти радіоелектронної техніки (РЕТ) представляють собою складні технічні системи. Тому до їх засобів діагностування висувуються жорсткі вимоги з точки зору забезпечення заданих параметрів діагностування [1, 2]. Забезпечити висунуті вимоги можна застосуванням нових ефективних принципів, методів і засобів для розробки сучасних засобів діагностування об'єктів РЕТ на основі нових ефективних методів діагностування з використанням сучасних інформаційних технологій.

**Аналіз стану проблеми.** Проведення якісного діагностування аналогових і цифрових радіоелектронних компонентів (РЕК) радіоелектронних пристроїв (РЕП) залежить від методу діагностування, адекватності діагностичної моделі (ДМ) об'єкта діагностування і методики проведення діагностування. Умовою прояву дефекту є зміна діагностичних параметрів (ДП) при виникненні будь-якого дефекту у радіоелектронних компонентах [1]. В якості методу діагностування пропонується енергодинамічний метод. Суть енергодинамічного методу отримання діагностичної інформації для контролю технічного стану РЕК полягає в тому, що в якості діагностичного параметра використовується значення напруги, що вимірюється на пристрої контролю технічного стану, який включено в шину живлення [3, 4].

Основою напівпровідникових радіоелектронних компонентів РЕП являються активні елементи (транзистори). Для визначення ДП транзистора необхідно розробити його діагностичну модель. Складовою частиною ДМ транзистора являється статична модель, що враховує процеси, що в ньому протікають. Дані процеси можуть бути проаналізовані за допомогою моделей, що враховують не тільки електрико-фізичні, а й фізико-хімічні властивості елементів в залежності від часу напруцювання.

**Постановка задачі.** Таким чином, для побудови сучасних засобів діагностування з використанням енергодинамічного методу діагностування необхідно визначити діагностичну модель транзистора, складовою частиною якої являється статична модель. Тому даній статті вирішується наукове завдання, що полягає в розробці статичної моделі транзистора для енергодинамічного методу діагностування.

**Виклад основного матеріалу.** При побудові статичної моделі транзистора для енергодинамічного методу діагностування використовуємо класичні моделі Еберса-Мола, Бьюфойя-Спаркса, Лінвілла. При проведенні аналізу процесів в транзисторі введемо наступні припущення:

тип транзистора  $n-p-n$ ;

в області бази існує прискорююче поле;  
домішки в базі вздовж вісі  $X$  (вісь, перпендикулярна переходам) розподілені за експоненційним законом;

колектор характеризується дифузійним механізмом переносу носіїв;  
емітерний перехід вважається різким, а колекторний плавним.

Для транзисторів  $n-p-n$  за позитивний напрям струмів прийmemo напрям від області “ $p$ ” до “ $n$ ”. Статична модель представляє собою струми емітера  $^{21}_a$ , колектора  $^{21}_e$  і бази  $^{21}_a$ . Знайдемо модель транзистора, що не враховує зміну надлишкової концентрації електронів  $n$  в активній області бази протягом часу старіння  $t'$ , тобто  $\partial n / \partial t' = 0$ .

В активному режимі роботи транзистора для аналізу використаємо рівняння неперервності, яке має вигляд [5]

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{2\eta}{W} \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{n}{L_n^2} = 0,$$

де  $W$  – ширина бази;  $\eta$  – коефіцієнт поля в базі;  $L_n$  – довжина дифузійного зміщення електронів в базі.

Рішенням цього рівняння являється функція

$$n(x) = n_1 e^{-\frac{ax}{2}} \frac{\text{sh } \theta(W-x)}{\text{sh } \theta W} + n_2 e^{-\frac{a(W-x)}{2}} \frac{\text{sh } \theta x}{\text{sh } \theta W}, \quad (1)$$

$$\text{де, } n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{\dot{a}\dot{a}}} - 1), \quad n_2 = n_p^W (e^{\lambda U_{\dot{e}\dot{e}}} - 1), \quad \theta = \sqrt{\left(\frac{\eta}{W}\right)^2 + \frac{1}{L_n^2}}; \quad a = \frac{2\eta}{W}; \quad \lambda = \frac{q}{KT}; \quad n_p^0, \quad n_p^W -$$

рівноважні концентрації електронів в базі на границі емітерного та колекторного переходів відповідно;  $U_{\dot{a}\dot{a}}$  – напруга, що прикладена до емітерного переходу,  $U_{\dot{e}\dot{e}}$  – напруга, що прикладена до колекторного переходу;  $q$  – заряд електрона.

Використавши рівняння квазінейтральності, можна записати:

$$\begin{aligned} \varphi - U_{\dot{a}} &= \frac{KT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}; \\ \varphi - U_{\dot{e}} &= \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p}; \\ p_p^+ &= N_a^- + n_p^-; \\ n_n^- &= N_a^+ + p_n^+, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $N_a$ ,  $N_{\dot{a}}$  – число акцепторів і донорів;  $\varphi = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_{\dot{a}}}{n_i^2}$  – контактна різниця потенціалів.

Розв'язуючи систему рівнянь (2), отримаємо

$$\begin{aligned} p_n &= \frac{\chi}{1-\chi^2} (N_a + \chi N_{\dot{a}}); \\ p_p &= \frac{1}{1-\chi^2} (N_a + \chi N_{\dot{a}}); \\ n_p &= \frac{\chi}{1-\chi^2} (N_{\dot{a}} + \chi N_a); \\ n_n &= \frac{1}{1-\chi^2} (N_{\dot{a}} + \chi N_a), \end{aligned}$$

$$\text{де } \chi = \frac{n_i^2}{N_a N_{\dot{a}}} e^{\lambda U_{\dot{a}\dot{a}}}.$$

Густина струму може бути визначена по відомому рівнянню струмів у напівпровіднику

$$j_n = q\mu_n n(x_1)E(x) + qD_n \frac{dn(x_1)}{dx}. \quad (3)$$

Помноживши обидві частини виразу (4) на площу напівпровідника  $S$  і провівши математичні перетворення отримаємо залежності для струмів емітера і колектора:

$$\begin{aligned} I_{\hat{a}} &= qD_n S(\theta \operatorname{cth} \theta W + \eta) n_1 - qD_n S \theta \operatorname{sch} \theta W K^{0.5} n_2; \\ I_{\hat{e}} &= -qD_n K^{0.5} \operatorname{sch} \theta W n_1 + qD_n S(\theta \operatorname{cth} \theta W - \eta) n_2. \end{aligned} \quad (4)$$

В бездрейфовому транзисторі поле бази відсутнє, тобто  $\ln K = 0$ ,  $N_{a0} = N_a^W$ ,  $\theta = 1/L_n$ , тому вираз (4) має вигляд:

$$\begin{aligned} I_{\hat{a}} &= qD_n S \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} \frac{1}{L_n} n_1 - qD_n S \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} \frac{1}{L_n} n_2; \\ I_{\hat{e}} &= -qD_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} S \frac{1}{L_n} n_1 + qD_n S \operatorname{coth} \frac{W}{L_n} \frac{1}{L_n} n_2, \end{aligned}$$

де,  $n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{\hat{a}\hat{a}}} - 1)$ ;  $n_2 = n_p^W (e^{\lambda U_{\hat{e}\hat{e}}} - 1)$ .

Складова рекомбінаційного струму в емітерному переході описується виразом:

$$I_{\hat{a}}^{\delta\hat{a}\hat{e}} = qSl^* \frac{\Phi_T}{\Delta\varphi_0 - U_{\hat{a}\hat{a}}} \frac{n_i^2}{\tau} e^{\frac{\lambda}{2} U_{\hat{a}\hat{a}}}, \quad (5)$$

де,  $l^* = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 (\Delta\varphi_0 - U_{\hat{a}\hat{a}})^{1/2}}{qN_a} \right)^{1/2}$ ;  $\Delta\varphi_0 = \varphi + \ln \frac{n_n}{n_p}$ ;  $n_i^2 = p_p^0 n_p^0 = N_a^0 n_p^0$ .

Інші складові знаходимо із виразу (3) при умові  $n_1 \neq 0$ ,  $n_2 \neq 0$ :

значення електронної складової струму емітера

$$I_{\hat{a}}^n = qD_n S(\theta \operatorname{cth} \theta W + \eta) n_p^0 e^{\lambda U_{\hat{a}\hat{a}}}, \quad (6)$$

значення електронної складової струму колектора

$$I_{\hat{e}}^n = qD_n S(\theta \operatorname{cth} \theta W - \eta) n_p^W (e^{\lambda U_{\hat{e}\hat{e}}} - 1). \quad (7)$$

В режимі насичення колекторний та емітерний переходи зміщені в прямому напрямку. При інжекції носіїв в базу їх надлишкова концентрація викликає збільшення базового струму. Падіння напруги на опорі бази, що створене за рахунок протікання струму бази, приводить до перерозподілу густини струму по поверхні переходу, що знижує ефективність переходу на краях. Густина рекомбінаційного струму в активній області бази можна визначити із векторних рівнянь:

$$\vec{\nabla} j_p = -\frac{qp}{\tau}, \quad \vec{\nabla} j_n = \frac{qn}{\tau}, \quad \text{а саме}$$

$$\begin{aligned} j_{px} &= -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} + qp\mu_p E_x; \\ j_{nx} &= qD_n \frac{\partial n}{\partial x} + qn\mu_n E_x, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{де, } E_x = \varphi_\tau \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad E_y = -\varphi_\tau \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}. \quad (9)$$

Струми емітера і колектора визначаються шляхом інтегрування густини струму по відповідним площам:

$$\begin{aligned} I_{\hat{e}} &= \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_1 - \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_2; \\ I_{\hat{a}} &= -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2, \end{aligned}$$

де,  $S'_n = S_r \frac{\sqrt{2}L_n}{y_e} \text{th} \frac{y_e}{\sqrt{2}L_n}$  – ефективна площа емітера.

Діркову складову струму емітера можна визначити шляхом інтегрування густини струму по площі емітера:

$$I'_e = -\frac{qD_{pe}}{L_{pe}} \frac{p_{e0}n_1^2}{n_i^2} S'_p, \quad (9)$$

$$\text{де, } S'_p = \frac{1}{2} \left[ S'_e \text{sch}^2 \left( \frac{y_e}{\sqrt{2}L_n} \right) + S'_n \right].$$

Діркова складову струму колектора:

$$I'_e = S_e q p_n^{w'_e} \theta_e \text{cth} \theta_e W'_e (e^{\lambda U_{ae}} - 1), \quad (10)$$

де,  $\theta_e = 1/L_p$ .

В режимі відсічки обидва переходи зміщені в зворотному напрямку, при цьому через електроди закритого транзистора протікають:

а) струми з активної області бази:

$$\begin{cases} I'_e = -qD_n S_e n_p^0 \theta \left[ \frac{a}{2\theta} + \text{cth} W' - \text{csch} \theta W' e^{\frac{aW'}{2}} \right]; \\ I'_e = qD_n S_e n_p^0 \theta e^{\frac{aW'}{2}} \left[ \text{csch} \theta W' - e^{-\frac{aW'}{2}} \left( \text{cth} \theta W' - \frac{q}{2\theta} \right) \right]; \\ I'_a = I'_e + I'_e, \end{cases}$$

$$\text{де, } W' = W_0 - 0,5 \left( \frac{9\varepsilon\varepsilon_0 |U_{aa} - U_{ea}|}{qN'} \right)^{1/3}; \quad n_p^0 (e^{\lambda U_{aa}} - 1) = -n_p^0; \quad n_p^w (e^{\lambda U_{ae}} - 1) = -n_p^0 e^{aW'};$$

$$|U_{ae}|, |U_{aa}| > (2...3)\varphi_T.$$

б) струм колектора з пасивної області бази:

$$I'_e = qD_n (S_e - S_a) n_p^w \theta \frac{\frac{S}{\theta} \left[ \text{ch} W'_n \theta - \frac{a}{2\theta} \text{sh} W'_n \theta \right] + D_n \left[ \text{sh} W'_n \theta - \frac{a^2}{4\theta^2} \text{sh} W'_n \theta \right]}{\frac{S}{\theta} + \text{sh} W'_n \theta + D_n \left[ \text{ch} W'_n \theta + \frac{a}{2\theta} \text{sh} W'_n \theta \right]} \quad (11)$$

в) струми термогенерації в переходах:

$$I'_{oa} = 0,5 \frac{q}{\tau_i} S_a n_e \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{qN_a} |U_{aa}|}; \quad (12)$$

$$I'_{oe} = 0,5 \frac{q}{\tau_i} S_e n_i \sqrt{\frac{9\varepsilon\varepsilon_0}{qN'} |U_{ae}|}. \quad (13)$$

Складові струму бази, що обумовлені інжекцією неосновних носіїв  $S_{aa}^{\dot{a}^3+}$ ,  $I_{\dot{a}}^{\dot{a}^3+}$  і  $S_e^{\dot{a}^3+}$ ,  $I_e^{\dot{a}^3+}$ , та складову рекомбінаційного струму в пасивній області бази  $I_{\dot{e}}^{\dot{a}^3\dot{n}}$ , можна визначити, використовуючи закон переходу:

$$\begin{aligned} I_{\dot{a}}^{\dot{a}^3+} &= \frac{1}{L_n} qD_n S_e^{\dot{a}^3+} \tilde{n}_p^0 (e^{\lambda U_{aa}} - 1); \\ I_e^{\dot{a}^3+} &= \frac{1}{L_n} qD_n S_e^{\dot{a}^3+} n_p^w (e^{\lambda U_{ae}} - 1); \end{aligned} \quad (14)$$

$$I_{\dot{e}}^{\text{fac}} = \frac{1}{L_n} q D_n S_n n_p^W (e^{\lambda U_{\dot{a}\dot{e}}} - 1). \quad (15)$$

Таким чином, визначені всі складові струмів в трьох режимах роботи транзистора, які забезпечують побудову його статичної моделі. Проведений аналіз процесів транзистора показав, що струми, які в ньому протікають будуть визначатися наступними виразами:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{\dot{a}}^i &= \dot{z}_{\dot{a}}^n + \dot{z}_{\dot{a}}^p + \dot{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}} - \dot{z}'_{\dot{e}} - \dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{a}} + \dot{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+}, \\ \dot{z}_{\dot{e}}^i &= -\dot{z}'_{\dot{a}} + \dot{z}_{\dot{e}}^n + \dot{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}} - \dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}} - \dot{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{n}} + \dot{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+}, \\ \dot{z}_{\dot{a}}^i &= \dot{z}_{\dot{a}}^i + \dot{z}_{\dot{e}}^i. \end{aligned} \quad (16)$$

В рівняннях (16) враховано, що при переході транзистора з одного стану в інший виникають енергодинамічні імпульси. Вони приводять до зміни струму в шині живлення. Також кристалом випромінюються електромагнітні імпульси [5]. Проте, при їх отриманні було припущено, що параметри транзистора від часу напрацювання не змінюються, тобто складова, що описує процес старіння, не враховувалась. Проведемо дослідження впливу часу напрацювання  $t'$  на складові статичної моделі транзистора.

Ефективне значення ширини бази  $W$  для схеми зі спільним емітером визначається формулою:

$$W' = W - 0,5 \left[ 3 \frac{\varepsilon \varepsilon_0 |U_{\dot{a}\dot{a}} - U_{\dot{e}\dot{a}}|}{q} \left( \frac{1}{N'_a} + \frac{1}{\sqrt{N'_a N'_g}} + \frac{1}{N'_g} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$\text{де, } N'_a = N_{a0} + N_{am} \left[ 1 - 2\Phi_0 \left( \frac{x\sqrt{2}}{2\sqrt{Dt'}} \right) \right]; \quad N'_g = N_{g0} + N_{gm} \left[ 1 - 2\Phi \left( \frac{x\sqrt{2}}{2\sqrt{Dt'}} \right) \right], \quad \varepsilon_0 -$$

електрична стала;  $\varepsilon$  – діелектрична проникність.

Враховуючи те, що ефективне значення ширини бази входить у всі складові струмів моделі, можна переписати рівняння (16) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{\dot{a}}^i &= (\tilde{z}_{\dot{a}}^i + \bar{z}_{\dot{a}}^i) + (\tilde{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}} + \bar{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}}) + (\tilde{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}} + \bar{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}}) - (\tilde{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{a}} + \bar{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{a}}) - (\tilde{z}'_{\dot{e}} + \bar{z}'_{\dot{e}}) + (\tilde{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+} + \bar{z}_{\dot{a}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+}) \\ \dot{z}_{\dot{e}}^i &= -(\tilde{z}'_{\dot{a}} + \bar{z}'_{\dot{a}}) + (\tilde{z}_{\dot{e}}^i + \bar{z}_{\dot{e}}^i) + (\tilde{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}} + \bar{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}}) - (\tilde{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}} + \bar{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}}) + (\tilde{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+} + \bar{z}_{\dot{e}}^{\dot{\delta}\dot{\alpha}\dot{e}+}), \end{aligned} \quad (18)$$

де, знаки  $\sim$  та  $\bar{\phantom{x}}$  визначають складові струму: залежну та незалежну від часу напрацювання відповідно.

Таким чином, представлена виразами (18) статична модель транзистора дає однозначну залежність струмів транзистора від напруг на переходах і від часу його напрацювання.

Перейдемо тепер від аналітичного запису моделі до еквівалентної схеми транзистора (рис. 1). Для врахування струмів термогенерації в різних режимах роботи, введемо генератори термострумів  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{a}}$  та  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}}$ , що моделюють механізми термогенерації носіїв в обернено зміщених переходах в границях активної області. Ефект витіснення струму на краї емітера в аналітичній моделі можна виразити величинами  $\dot{z}'_{\dot{a}}$  і  $\dot{z}'_{\dot{e}}$ . Відповідно, активна область транзистора моделюється діодами  $D_{\dot{a}}$  та  $D_{\dot{e}}$ , що залежать від генераторів струму  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{a}}$  та  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}}$ .

Інжекція носіїв пасивною та бічною площами колекторного переходу моделюється діодами  $D_{\dot{e}}^i$  та  $D_{\dot{e}}^{\dot{a}}$ , які зашунтовані генераторами термострумів  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}\dot{a}}$  та  $\dot{z}_{\dot{\delta}\dot{\alpha}}^{\dot{e}\dot{a}}$ . Явище інжекції носіїв бічною поверхнею емітера представлене у вигляді діода з базою  $D_{\dot{a}}^{\dot{a}}$ , що зашунтований в режимі відсічки генератором струму термогенерації бічної поверхні емітера.

З метою відображення впливу опору колектора і бази на характеристики транзистора при великих струмах колектора введені опори  $r_{\dot{e}}$  та  $r_{\dot{a}}$ .

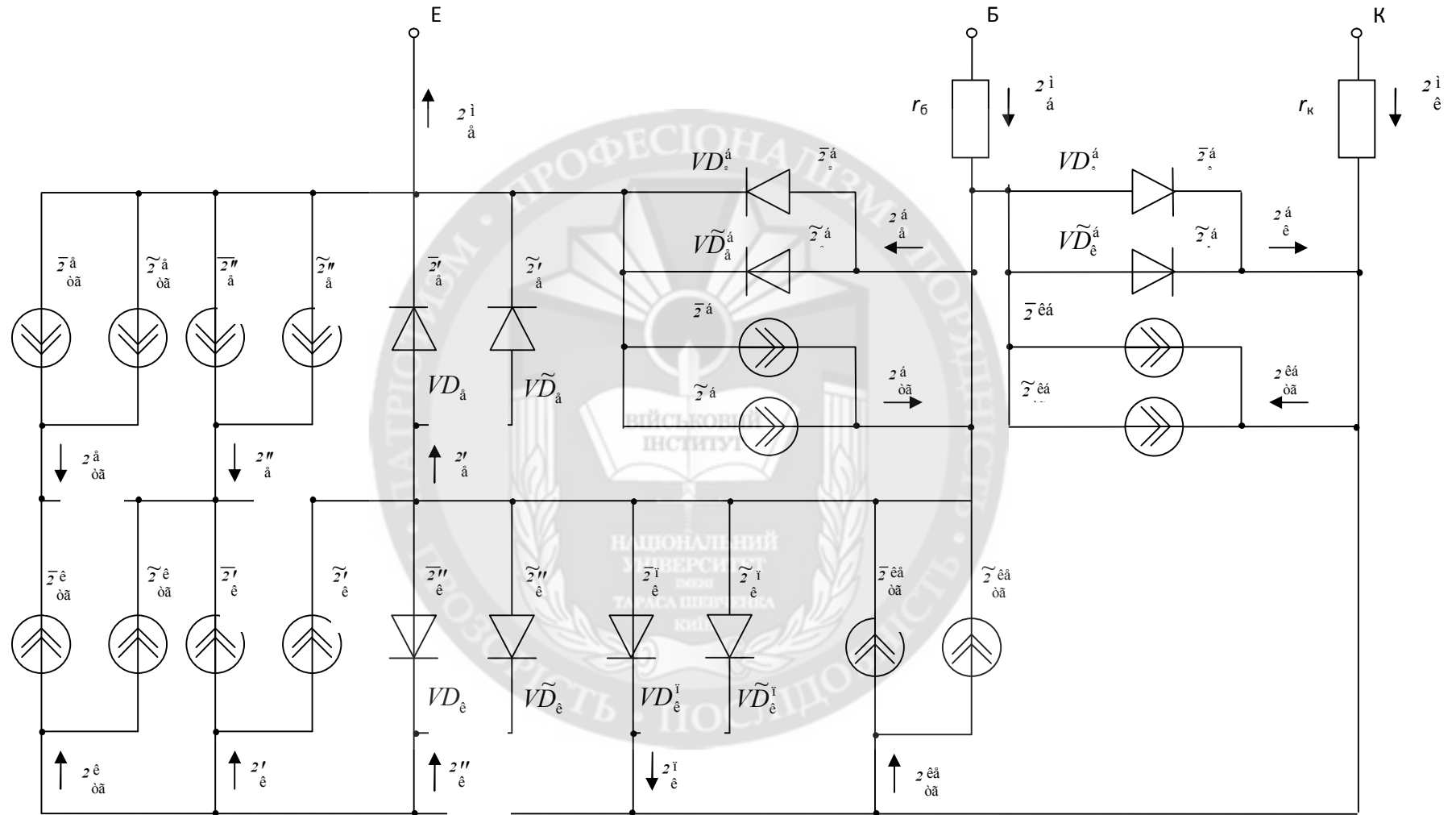


Рис. 1. Еквівалентна схема транзистора

Еквівалентна схема транзистора для статичного режиму зображена на рис. 1. Перехід від умовних струмів на еквівалентній схемі до струмів, заданих аналітичною моделлю (18) приведений в табл. 1. і табл. 2.

Таблиця 1

Струми на еквівалентній схемі

Струми на еквівалентній схемі	$2'$											
Умовні позначення струмів	$2_1 +$											

Таблиця 2

Струми, що задані аналітичною моделлю

Струми	Аналітичний вираз струмів
$I_1$	$-qn_1S'_nD'_n[a' + \theta \text{cth} \theta W']$
$I_2$	$qn_i^2S'_pD_{pe}P_n^0 / (n_i^2L_{pe})$
$I_3$	$qS'_nI_e^* \phi_0 n_i \exp\{\lambda'U_{aa} / \tau(\Delta\phi_0 - U_{aa})\}$
$I_4$	$qS'_nD'_n \text{csch} \theta W' \exp\left(-\frac{aW'}{2}\right)n_2$
$I_5$	$qn_1S'_nD'_n \exp\left(-\frac{aW'}{2}\right)\theta \text{csch} \theta W'$
$I_6$	$qn_2S'_nD'_n[a' + \theta \text{cth} \theta W']$
$I_7$	$qp_2S'_pD'_p\theta_eW_e$
$I_8$	$0,5S_{\hat{a}}^{\hat{a}}qn_i(2\epsilon\epsilon_0 U_{\hat{a}\hat{a}}/qN'_e)^{1/2}/\tau_i$
$I_9$	$0,5S_{\hat{e}}^{\hat{e}}qn_i(9\epsilon\epsilon_0 U_{\hat{a}\hat{e}}/qN'_e)^{1/2}/\tau_i$
$I_{10}$	$0,5S_{\hat{a}}^{\hat{a}^{\pm}}qn_i(2\epsilon\epsilon_0 U_{\hat{a}\hat{a}}/qN'_e)^{1/2}/\tau_i$
$I_{11}$	$S_e^{\hat{a}^{\pm}}qD'_n\tilde{n}_p^0(e^{\lambda'_eU_{ae}} - 1)/L_n$
$I_{12}$	$qD_nS_{\hat{e}}^{\hat{a}\hat{n}}n_p^W(e^{\lambda'_eU_{ae}} - 1)/L_n$
$I_{13}$	$0,5qS_{\hat{e}}^{\hat{a}\hat{n}}n_i(9\epsilon\epsilon_0 U_{\hat{a}\hat{e}}/qN'_e)^{1/3}/\tau_i$
$I_{14}$	$qD_nS_e^{\hat{a}^{\pm}}\tilde{n}_p^W(e^{\lambda'_eU_{ae}} - 1)/L_n$
$I_{15}$	$0,5qS_{\hat{e}}^{\hat{a}^{\pm}}n_i(9\epsilon\epsilon_0 U_{\hat{a}\hat{e}}/qN'_e)^{1/3}/\tau_i$

Таким чином, розроблено статичну модель транзистора для енергодинамічного методу діагностування. Використання сучасних інформаційних технологій дає можливість розробити алгоритм побудови статичних моделей різних типів транзисторів з метою визначення їх діагностичних параметрів.

**Висновки.** Проведений аналіз процесів транзистора роботи дозволив зробити важливі практичні висновки:

1) розроблено статичну модель транзистора для енергодинамічного методу діагностування;

2) розроблена статична модель транзистора дозволяє визначати його діагностичні параметри у вигляді залежностей струму  $I_a$  і  $I_e$  від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів з врахуванням процесів старіння напівпровідників;

3) для побудови діагностичних моделей для різних типів транзисторів необхідно розробити алгоритм і прикладну програму.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Гунченко Ю.О., Жиров Г.Б., Вишнівський О.В., Кольцов Р.Ю. Розвиток інформаційних технологій для систем контролю та діагностики об'єктів РЕЗО // Науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології» Одеський національний морський університет. – Одеса, 2012. – С.23 – 25.

2. Клец Ю.П. Бессловарный поиск неисправностей – новый подход к диагностированию цифровых устройств / Ю.П. Клец, Ю.Г. Савченко, В.Н. Чешун // Управляющие системы и машины. – 2001. – № 3. – С. 36–41.

3. Гахович С.В. Удосконалений метод діагностування цифрових пристроїв з використанням параметрів енергодинамічного процесу при відновленні їх працездатності у військових ремонтних органах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 20.02.14 / С.В. Гахович. – К., 2004. – 20 с.

4. Гахович С.В. Спектральний аналіз енергодинамічного процесу для діагностування цифрових ТЕЗ // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2010. – № 27. – С.23 – 30.

5. Шкуліпа П.А. Побудова алгоритмів для розробки діагностичної моделі транзистора енергодинамічним методом діагностування // Наукові нотатки постійно діючого семінару науковців, здобувачів та ад'юнктів. – Випуск №19. – Київ: ВІКНУ, 2011. – С. 13–25.

**Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В.**

