

Микола Жердев, Василь Кузавков

ВІТІ ДУТ

УДК 681.35

АЛГОРИТМ АНАЛІЗУ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРА В КЛЮЧОВОМУ РЕЖИМІ

Анотація: Розглядається нова діагностична модель транзистора для безконтактного індукційного методу діагностування. Визначення технічного стану радіоелектронної техніки (РЕТ) систем захисту інформації пов'язано з реєстрацією діагностичних параметрів (ДП) радіо електронних компонентів (РЕК) що входять до її складу. Використання нового методу діагностування потребує нових діагностичних моделей, що відображують зв'язок ДП з електрофізичними та фізико хімічними властивостями РЕК.

Summary: We consider a new diagnostic model of the transistor for contactless inductive method of diagnosis. Definition technical state of the radio-electronic technology (RET) систем захисту інформації is related to the registration of diagnostic parameters (DP) radio electronic components (REC) members of her stuff. Using a new method of diagnosing needs new diagnostic models that reflect the relationship with DP electro physics and chemical physics properties of REC.

Ключові слова: діагностична модель, безконтактний індукційний метод.

І Вступ

Формальний опис об'єкту діагностування (ОД), що враховує можливість зміни його стану в часі називається діагностичною моделлю. Подібні моделі повинні володіти властивостями виявлення і розрізнення несправностей. Цифрові блоки, які складають основу радіоелектронної техніки (РЕТ) систем захисту інформації, як ОД і моделювання, володіють функціонально різноманітністю, ієрархічною конструкцією і відрізняються складністю виконуваних задач, високою автономністю, високою ціною наслідків відмов, що дозволяє віднести їх до категорії складних систем, які представляються основними групами діагностичних моделей, а саме:

- безперервні моделі, які представляють об'єкт і процеси, що протікають в ньому, в безперервно змінюваному часі являються аргументом модельних функцій;
- дискретні моделі, які визначають стан ОД для послідовності дискретних значень часу;
- гібридні моделі, які описують реальні об'єкти, що складаються з блоків безперервної дії і дискретних блоків;
- спеціальні моделі, які враховують особливості діагностичного забезпечення і функціонування об'єкта.

За видами представлення взаємозв'язків між станом ОД, його елементами і параметрами вихідних сигналів методи синтезу моделей поділяються на аналітичні, графоаналітичні, функціонально-логічні і інформаційні [1].

Графічні моделі володіють наочністю, відображають логіку взаємодії елементів об'єкта, проходження енергії і інформації. Використовуються для розробки алгоритмів діагностування, які розрізняють дефекти типу обрив і перевантаження. Подібні моделі мають обмеження: елементи можуть мати будь-яке число входів, але тільки один вихід.

Матричні моделі зручні для обробки на електронно-обчислювальних машинах і не вимагають користувача високої кваліфікації при підготовці вихідних даних. На їх базі можливий синтез як умовних, так і безумовних алгоритмів діагностування. Ці моделі мають обмеження на ступень пошкодження об'єкта: при наявності кратних дефектів можливе встановлення неправдивого діагнозу. Вони можуть подаватися в формі таблиці дефектів, матриці станів, таблиці функцій несправностей і широко використовуються при розробці засобів технічного діагностування.

Математичні і інформаційні моделі використовуються головним чином при проектуванні засобів і систем технічного діагностування складних об'єктів на базі електронно-обчислювальних машин. Виходячи з розглянутого та враховуючи особливості побудови радіоелектронного компоненту (РЕК) цифрового блоку РЕТ для визначення його ТС будемо використовувати наступну математичну модель.

Цифрові блоки РЕТ складаються з напівпровідникових РЕК, основою яких є активні елементи (транзистори) що працюють в ключовому режимі. Тому в статті розглянуто модель транзистора.

Для визначення діагностичних параметрів транзистора, його діагностичну модель (ДМ) необхідно розробити з урахуванням процесів, що в ньому протікають. Дані процеси можуть бути проаналізовані за допомогою моделей, які враховують електрофізичні та фізико-хімічні властивості напівпровідникового

пристрою в залежності від часу напрацювання. Знання цих властивостей дозволяє використовувати для діагностування та прогнозування ТС безконтактний індукційний метод [2].

Для побудови ДМ транзистора в активному режимі роботи використано класичні моделі Еберса-Мола, Бьюфойя-Спаркса, Лінвілла та розроблено відповідний алгоритм.

Аналіз процесів в транзисторі проведено при наступних припущеннях:

- тип транзистора n-p-n;
- в області бази створено поле, що прискорює;
- домішки в базі вздовж вісі X (вісь, перпендикулярна переходам) розподілені за експонентним законом;
- колекторний перехід характеризується дифузійним механізмом переносу носіїв;
- емітерний перехід вважається різким, а колекторний плавним;
- модель транзистора в активному режимі одновимірна.

II Основна частина

Розглянемо дві складові одновимірної моделі транзистора в активному режимі:

а) стаціонарну, в якій зміна надлишкової концентрації електронів n в активну область бази протягом часу старіння t не відбувається, іншими словами $\partial n / \partial t = 0$;

б) складову, що описує процес старіння, для якої число акцепторів N_a та донорів N_d є функціями часу старіння t .

Алгоритм дає змогу визначити ДМ транзистора в ключовому режимі роботи у вигляді залежностей струму I_e і I_k від його електрико-фізичних та фізико-хімічних параметрів, та можливо використовувати для різних типів транзисторів.

В ключовому режимі колекторний та емітерний переходи зміщені в прямому напрямку ($U > \varphi_\tau$). При інжекції носіїв в базу їх надлишкова концентрація викликає збільшення базового струму, який в планарних структурах протікає паралельно переходам. Падіння напруги на опорі бази, що створене за рахунок протікання струму бази, приводить до перерозподілу густини струму по поверхні переходу.

Проведемо аналіз процесів в ключовому режимі наступним чином:

- отримаємо двовимірну функцію розподілу концентрації носіїв в базі;
- визначимо густини струмів і проведемо перехід до струмів насиченого транзистора.

Аналіз процесів проведемо для лінійної структури. Припустимо, що потік неосновних носіїв напрямлений вздовж вісі y , потік основних носіїв вздовж вісі x (для прямокутної системи координат) або r (для циліндричної системи координат). Для того, щоб уникнути ортогональних розкладів функції при розділенні змінних, припустимо, що густини струму дірок і електронів $j_{px} = j_{nr} = 0$.

Густину рекомбінаційного струму в активній області бази можна визначити із векторних рівнянь

$$\vec{\nabla} j_p = -\frac{qp}{\tau}; \quad \vec{\nabla} j_n = \frac{qn}{\tau}, \quad (1)$$

або:

$$\begin{aligned} j_{px} &= -qD_p \frac{\partial p}{\partial x} + qp\mu_p E_x; \\ j_{nx} &= qD_n \frac{\partial n}{\partial x} + qn\mu_n E_x. \end{aligned} \quad (2)$$

З урахуванням умови квазінейтральності для ключового режиму [2]:

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varphi - U_e &= \frac{KT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}; & \varphi - U_e &= \frac{KT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p}; \\ p_p^+ &= N_a^- + n_p^-; & n_n^- &= N_d^+ + p_n^+, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} - \text{контактна різниця потенціалів.}$$

Враховуючи умову (4), із рівнянь (2) знайдемо напруженість поля вздовж осей:

$$E_x = \varphi_\tau \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad E_y = -\varphi_\tau \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}. \quad (5)$$

Густина струму може бути визначена по рівнянню струмів у напівпровіднику:

$$j_n = q\mu_n n(x_1)E(x) + qD_n \frac{dn(x_1)}{dx}. \quad (6)$$

Підставляючи вираз (5) у (6), отримаємо значення складових струмів

$$j_{nx} = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \left(1 + \frac{n}{n + N_a} \right); \quad (7)$$

$$j_{py} = -qD_p \frac{\partial n}{\partial y} \left(1 + \frac{n + N_a}{n} \right).$$

Для високого рівня інжекції справедливий вираз $n + N_a \approx n$. Тоді:

$$j_{nx} = 2D_n q \frac{\partial n}{\partial x}; \quad (8)$$

$$j_{py} = -2D_p q \frac{\partial n}{\partial y}$$

Розподіл концентрації електронів вздовж осі x можна знайти, розв'язавши рівняння неперервності у вигляді:

$$diVj_n = \frac{q_n}{\tau_n}.$$

Після підстановки значення j_n із виразу (8) отримуємо рівняння:

$$2D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{n}{\tau_n}, \quad (9)$$

рішенням якого є функція:

$$n(x) = n_1 \frac{\text{sh} \frac{W-x}{L_n}}{\text{sh} \frac{W}{L_n}} + n_2 \frac{\text{sh} \frac{x}{L_n}}{\text{sh} \frac{W}{L_n}}. \quad (10)$$

Розподіл електронів вздовж осі z чи y описується рівнянням:

$$\nabla^2 n = n \frac{q}{\tau}. \quad (11)$$

Використовуючи оператор Лапласа для прямокутної системи координат, рівняння (11), запишемо:

$$\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} - na = 0. \quad (12)$$

Допускаючи, що базовий струм протікає паралельно переходам і перпендикулярно до осьової лінії емітер-колектор з лінійчатою геометрією, тобто $\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = 0$, отримаємо спрощене рівняння

$$\frac{\partial^2 n}{\partial y^2} - na = 0, \quad (13)$$

Позначимо:

$$\frac{d^2 n}{dy^2} = y''; \quad n = y; \quad -a = \lambda.$$

Тоді вираз (12) прийме вигляд

$$y'' + \lambda y = 0, \tag{14}$$

рішенням якого є

$$y = C_1 \operatorname{ch} x \sqrt{|\lambda|} + C_2 \operatorname{sh} x \sqrt{|\lambda|}, \quad (\lambda < 0), \tag{15}$$

де C_1, C_2 – постійні інтегрування.

Для транзисторів, симетричних відносно осі емітера, вираз (15) має вигляд:

$$y = C_1 \operatorname{ch} x \sqrt{|\lambda|}. \tag{16}$$

При граничних умовах:

$$\bar{n}|_{y=y_e} = 1; \quad \left. \frac{\partial \bar{n}}{\partial y} \right|_{r \rightarrow 0} \neq \infty, \tag{17}$$

та враховуючи:

$$\lambda = \frac{1}{2L_p^2}$$

рівняння (13) має рішення:

$$\bar{p}(y) = \bar{n}(y) = \frac{\operatorname{ch} \frac{y}{\sqrt{2L_n}}}{\operatorname{ch} \frac{y_e}{\sqrt{2L_n}}}, \tag{18}$$

де (18) розподіл носіїв заряду вздовж осі y .

Використовуючи вирази (10), (12) і (18), запишемо двовимірні функції розподілу концентрації носіїв для транзисторів з лінійчатою геометрією [2]:

$$n(x, y) = \left[n_1 \frac{\operatorname{sh} \frac{W-x}{L_n}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_n}} + n_2 \frac{\operatorname{sh} \frac{x}{L_n}}{\operatorname{sh} \frac{W}{L_n}} \right] \frac{\operatorname{ch} \left(\frac{y}{\sqrt{2L_n}} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_e}{\sqrt{2L_n}} \right)}. \tag{19}$$

Виконавши диференціювання вираз (12) по осі x і підставивши результати диференціювання в рівняння (8), отримаємо для прямокутних координат:

$$j_{n0}(x=0, y) = j_n(x=0) \frac{\operatorname{ch} \left(\frac{y}{\sqrt{2L_n}} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_e}{\sqrt{2L_n}} \right)};$$

$$j_{nk}(x=W, y) = j_n(x=W) \frac{\operatorname{ch} \left(\frac{y}{\sqrt{2L_n}} \right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{y_e}{\sqrt{2L_n}} \right)}. \tag{20}$$

Струм колектора визначають шляхом інтегрування густини струму по відповідним площам:

$$I_k = -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2; \quad (21)$$

де $S'_n = S_r \frac{\sqrt{2}L_n}{y_e} \operatorname{th} \frac{y_e}{\sqrt{2}L_n}$ – ефективна площа колектор - емітерного переходу транзистора з лінійчатою геометрією.

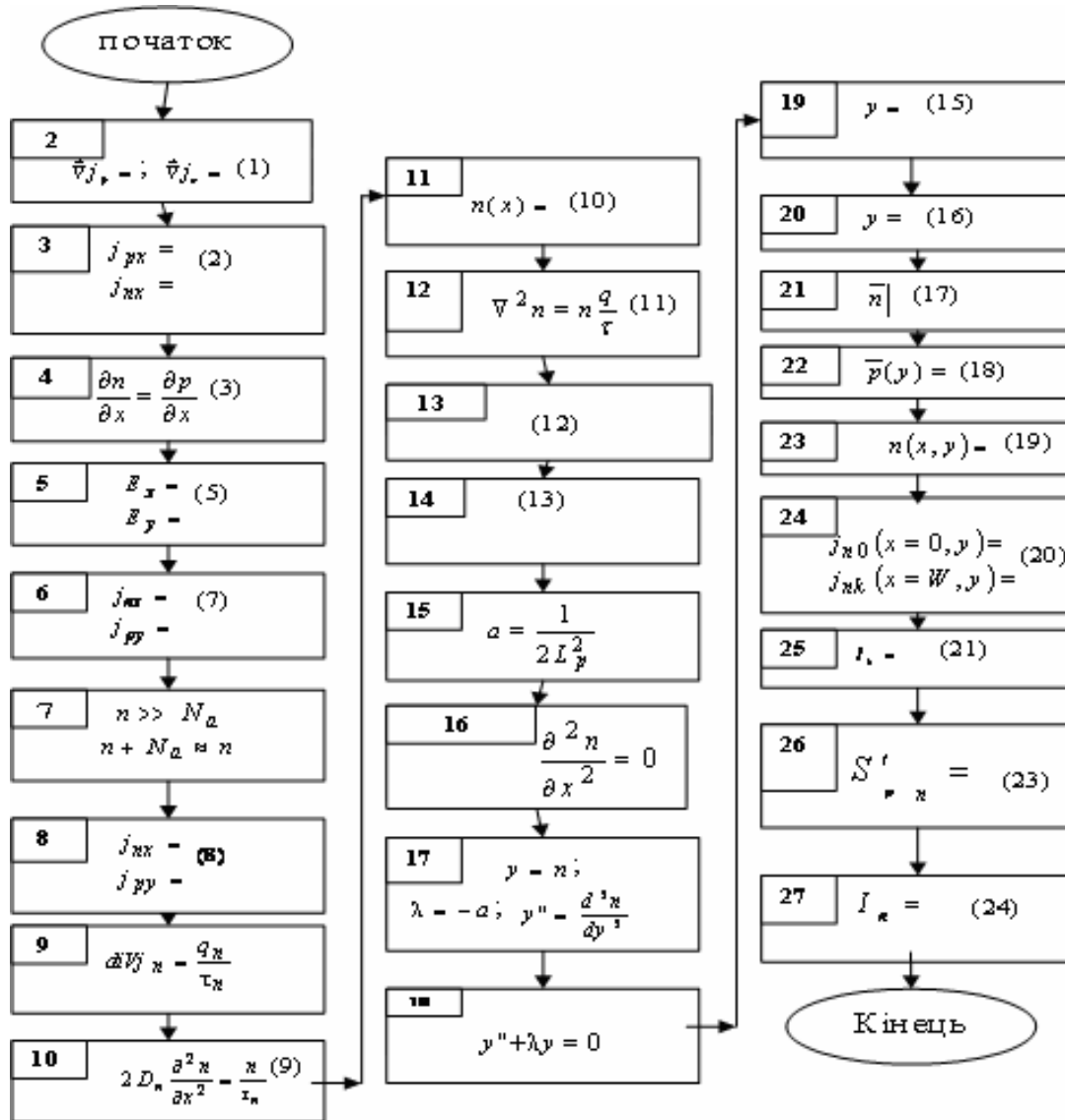


Рисунок 1 Алгоритм побудови діагностичної моделі транзистора в ключовому режимі

Значення S'_n можливо визначимо з виразу розподіленого опору переходу колектор-емітер [3]:

$$R = \rho \frac{d}{S'_n} \quad (22)$$

де $\rho = \frac{1}{\mu n q}$ удільний об'ємний опір в $p-n$ ($n-p$) переході.

Значення розподіленого опору переходу колектор-емітер має вид:

$$R = \frac{d}{\mu n q S'_n} \quad (22)$$

де μ - рухомість основних носіїв заряду;

q - заряд електрону;

d - товщина переходу;

Ефективна площа колектор - емітерного переходу транзистора з урахуванням розподіленого опору переходу колектор-емітер має вид:

$$S'_n = \frac{d}{\mu n q R} \quad (23)$$

З урахуванням (23), струм колектор - емітерного переходу транзистора з лінійчатою геометрією:

$$I_k = -\frac{2dD_n}{\mu n L_n R} \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2dD_n}{\mu n L_n R} \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2 \quad (24)$$

III Висновки

Таким чином, в статті вирішена наукова задача, що полягає у побудові діагностичної моделі транзистора в ключовому режимі для безконтактного індукційного методу діагностування. Вираз (24) визначає залежність струму колектора транзистору в залежності від фізико-хімічних властивостей напівпровідника.

Для розрахунку діагностичної моделі пропонується алгоритм, приведений на рис. 1. Для спрощення побудови алгоритму використовувались номери формул.

Алгоритм можливо використовувати для різних типів транзисторів. Він дає змогу визначити ДМ транзистора в ключовому режимі роботи у вигляді залежностей струму I_k від електрофізичних та фізико-хімічних параметрів.

Список використаної літератури: 1. Ленков С. В., Карпенко О. В., Шкуліпа П. А. Діагностична модель радіо компонента для електромагнітного методу діагностування у складі радіоелектронного пристрою // Науково-практичний журнал «Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони». – Київ, 2011. - №3(12). – С.31 – 33. 2. Вишнівський В. В., Жердєв М. К., Креденцер Б. П., Кузавков В. В., Редзюк С. В. Безконтактний індукційний метод діагностування радіоелектронних блоків // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2013. – Вип. №43. – 336 с. 3. Кузавков В. В. Діагностична модель р-п (п-р) переходу в динамічному режимі для безконтактного індукційного методу діагностування. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2014. – Вип. №45. – 206 с