

УДК 621.396.677

Г. В. Єрмаков, О. О. Казіміров, М. І. Новіков, А. В. Ірха

## ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ РАДІОЕЛЕМЕНТІВ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ КОРОТКИХ ІМПУЛЬСІВ

Запропонована ймовірнісна модель функціонального ураження напівпровідникових елементів внаслідок використання послідовностей потужних ультракоротких сигналів. Модель дозволяє визначити ймовірність появи пошкоджень у різних типах напівпровідникових елементів за нормального закону розподілення теплової енергії, що виділяється у процесі поглинання енергії електромагнітних коливань. Отримані кількісні оцінки для ймовірності відмов вхідних трактів приймальних пристроїв у разі використання послідовностей потужних короткоімпульсних сигналів.

*К л ю ч о в і с л о в а:* нормальний закон розподілення, ймовірність відмов, короткоімпульсні сигнали.

**Постановка проблеми.** Сучасні збройні конфлікти характеризуються широким застосуванням систем управління, об'єднаних в єдину інформаційну мережу за допомогою різних спеобчислювачів. Для протидії таким "розумним" комбінованим засобам доцільно використовувати радіотехнічні пристрої, що здійснюють функціональне заглушення або ураження елементної напівпровідникової бази. У цьому випадку необхідно розробити математичну модель пошкоджень радіокомпонентів, що дозволить оцінювати випадкові фактори, які впливають на ефективність деградації напівпровідникових елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз робіт [1–3] показує, що значну роль у оцінюванні рівнів пошкодження напівпровідникових елементів відіграє режим впливу. Очевидно, що наявність та глибина пошкоджень є ймовірнісною величиною, яка залежить від багатьох факторів. Відома теплова модель деградації радіоелементів передбачає використання послідовності наносекундних сигналів з періодом, меншим ніж час теплової релаксації  $p$ - $n$  переходу.

Водночас ефект деградації може спостерігатися і тоді, коли період пачки значно більше часу релаксації [4]. У такому випадку вважають, що під дією одного імпульсу відбувається незначна локальна зміна структури, наприклад, утворення дефекту. Вихід пристрою з ладу відбуватиметься після досягнення деякого критичного числа дефектів.

**Метою статті** є розроблення ймовірнісної моделі функціонального ураження напівпровідникових елементів вхідних трактів приймальних пристроїв.

**Виклад основного матеріалу.** Зміна характеристик вхідних трактів приймальних пристроїв пов'язана зі зміною диференціальної провідності  $p(t)$   $p$ - $n$  переходу. У разі досягнення деякого критичного значення  $p(t) = P_{кр}$  відбуватиметься деградація приймального пристрою. Очевидно, що розміри та кількість дефектів залежать від енергії імпульсу та типу напівпровідника.

Процес деградації відбуватиметься в результаті впливу послідовних коротких сигналів тривалістю  $\tau_c$  і періодом повторення  $T_c$ . Для оцінювання швидкості зміни диференціальної провідності  $p$  доцільно використати активаційну теорію Арреніуса [5].

Зміну параметра  $p(t)$  під дією пачки з  $N$  імпульсів описує вираз [5]:

$$p_N = V_0 \eta(N, T_c, \gamma) \exp(-\gamma T_c) \int_0^{T_c} \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T(t)} + \gamma t\right) dt, \quad (1)$$

де  $\eta(N, T_c, \gamma) = \frac{1 - \exp(-\gamma N T_c)}{\exp(-\gamma T_c)}$ ;  $V_0$  – стала швидкості зміни провідності,

що залежить від типу дефектів;  $k_B$  – стала Больцмана;  $T(t)$  – температура випрямляючого контакту, яка змінюється під дією послідовності імпульсів;  $\gamma$  – релаксаційний параметр, що описує процес відновлення напівпровідникової структури.

У даному випадку локальне пошкодження та поява дефектів у структурі  $p$ - $n$  переходу обумовлені його інтенсивним локальним розігрівом під дією енергії імпульсів.

Статистичні флуктуації диференціальної провідності випрямляючого контакту  $p(t)$  пов'язані з випадковою величиною енергії  $E_a$ , тобто саме її флуктуації визначають статистику деградації.

Ймовірність деградації напівпровідникового елемента можна оцінити як вірогідність перевищення параметром  $p$  критичного значення  $p_{кр}$ :

$$P = \int_{p_{кр}}^{\infty} g(p) dp,$$

де  $g(p)$  – щільність ймовірності випадкової величини  $p$ .

Якщо для випадкової неперервної величини  $E_a$  відома щільність розподілу ймовірності  $f(E_a)$ , то ймовірність деградації напівпровідникового елемента  $P$  можна оцінити як ймовірність перевищення параметром  $p$  (після впливу  $N$  імпульсів послідовності) критичного значення  $p_{кр}$  [6]:

$$P = \int_{E_0}^{E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta)} f(E_a) dE_a, \quad (2)$$

де  $E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta) = k_B T \{ \ln(\delta) + \ln[\eta(N, T_c, \gamma)] \}$  – розв'язок рівняння (1) за умов  $p_N = p_{кр}$ ;  $\delta = V_0 \tau_c / p_{кр}$ .

Для оцінювання ймовірності деградації напівпровідникового елемента припустимо, що енергія  $E_a$  має нормальний закон розподілу з середнім  $E_{сер}$  і дисперсією  $\Delta^2$ . За центральною граничною теоремою такий закон може бути обґрунтований для всіх напівпровідникових структур, включаючи одиночні (діоди) або численні  $p$ - $n$  переходи (мікросхеми).

У такому випадку ймовірність пошкодження (перевищення  $P_{кр}$ ) для  $E_{сер} > E_0$  матиме вигляд [5]:  
якщо  $E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta) \geq E_{сер}$ , то

$$P = \Omega \cdot \Delta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{erf} \left( \frac{E_{сер} - E_0}{\sqrt{2}\Delta} \right) + \\ + \operatorname{erf} \left( \frac{E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta) - E_{сер}}{\sqrt{2}\Delta} \right) \end{array} \right\};$$

якщо  $E_0 < E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta) < E_{сер}$ , то

$$P = \Omega \cdot \Delta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{erf} \left( \frac{E_{сер} - E_0}{\sqrt{2}\Delta} \right) - \\ - \operatorname{erf} \left( \frac{E_{сер} - E(T, T_c, \gamma, \eta, \delta)}{\sqrt{2}\Delta} \right) \end{array} \right\},$$

де  $\Omega = \Delta \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{E_{сер}}{\sqrt{2}\Delta} \right) \right\}$ ;  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ .

Величину  $E_0$  можна оцінити як  $E_{кр} = k_B T_{кр}$ , де  $T_{кр} = T_0 + \Delta T_{кр}$  – критичне значення температури, що використовується в моделі Вунша – Белла, у разі досягнення якого відбувається пошкодження  $p$ - $n$  переходу. Величину  $\Delta T_{кр}$  для різних  $p$ - $n$  переходів, наприклад кремнієвих, можна визначити за емпіричним виразом, що наведений у [7]. Так, для  $p$ - $n$  переходів з напругою лавинного пробою -7... -9 В,  $\Delta T_{кр} = 350... 5000$  °С.

Результати розрахунків показали, що при збільшенні кількості імпульсів ймовірність деградації  $p$ - $n$  переходу прямує до свого граничного значення. Якщо період проходження сигналів у паці менше часу релаксації, то деградація елементів може відбуватися вже за умови 200...300 імпульсів у паці. У тому випадку, якщо час релаксації менше періоду проходження імпульсів, деградація настає за умови 800...1000 імпульсів та визначених вище значеннях енергії сигналу. При цьому залежність ймовірності ушкоджень від тривалості імпульсу набагато менша.

На рис.1 представлена залежність ймовірності деградації напівпровідникових елементів  $P$  від частоти повторення імпульсів  $F_c$  для нормального закону розподілу. Графіки побудовані для  $E_{сер}/k_B T(\tau_c) = 10$ ,  $E_{сер}/E_0 = 10$ ,  $\delta = 3$ ,  $\gamma = 10^{-4}$ ,  $N = 800$ . Крива 1 відповідає  $\Delta/E_{сер} = 1,3$ ; крива 2 відповідає  $\Delta/E_{сер} = 1,8$ ; крива 3 відповідає  $\Delta/E_{сер} = 2$ .

На рис. 2 представлена залежність ймовірності деградації напівпровідникових елементів від відносної енергії  $E/E_{кр}$  для нормального закону розподілу. Графіки на рис. 1 та 2 побудовані для  $\Delta/E_{сер} = 1$ ,  $E_{сер}/E_0 = 1$ ,  $\delta = 1$ ,  $N = 800$ . Крива 1 відповідає  $\gamma T_c = 10^{-2}$ ; крива 2 відповідає  $\gamma T_c = 10^{-5}$ .

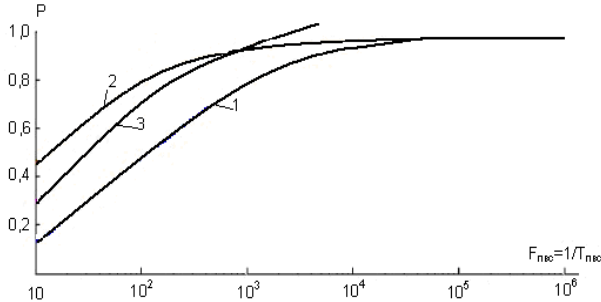


Рис. 1. Залежність ймовірності деградації від частоти повторення імпульсів

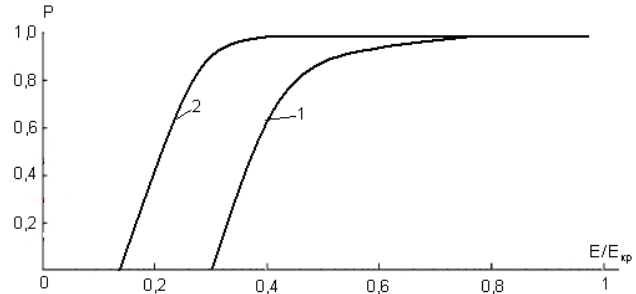


Рис. 2. Залежність ймовірності деградації від відносної енергії

Криві на рис. 2 показують, що вихід з ладу напівпровідникового приладу відбувається у випадку перевищення певного рівня потужності. Крім цього, зі зменшенням періоду повторення імпульсів енергія  $E_{50\%}$  імпульсу, необхідна для деградації напівпровідникового переходу, зменшується.

### Висновки

Запропоновано ймовірнісну модель функціонального ураження напівпровідникових елементів, у якій статистичні особливості процесу пошкодження визначаються флуктуаціями енергії пачки ультракоротких сигналів. Модель дозволяє описувати залежність ймовірності деградації  $p-n$  переходів від числа руйнівних радіоімпульсів  $N$ , періоду пачки  $T_c$ , тривалості імпульсу  $\tau_c$  і потужності сигналу.

### Список використаних джерел

1. Garver R.V., Fazi C., Druns H. Dynamic diode mixer damage measurements // 1985 IEEE MTTs Int. Microwave Symp. Digest. – P. 535–536.
2. Glan Chance V. Transsin mixer damage // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest., 1989. – P. 475–477.
3. Christon A. GaAs mixer burnout mechanisms at 36-94 GHz // Annual Proc. Reliab. Physics, 1980. – P.140–144.
4. Васильев, К. Б. Статистика отказов цифровых ИМС, вызванных импульсным радиоизлучением [Текст] / К. Б. Васильев, А. В. Ключник, А. В. Солодов // 9-я Междунар. Крымская конф. “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – Севастополь, 1999. – С. 329 – 330.
5. Ключник, А. В. Статистика повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением [Текст] / А. В. Ключник, А. В. Солодов, Ю. А. Пирогов // Радиоэлектроника. – 2010. – № 12. – С. 22 – 29.
6. Ключник, А. В. Моделирование вероятности повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением [Текст] / А. В. Ключник, А. В. Солодов, Ю. А. Пирогов // IV Всероссийская конференция “Радиолокация и радиосвязь”. – М. : ИРЭ РАН, 2010. – С. 255 – 261.
7. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37 – 52.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2011 р.