

УДК 621.396.677

Г. В. Єрмаков, М. І. Новіков, О. І. Воронін, М. О. Глущенко, А. В. Ірха

АНАЛІЗ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ ЦИФРОВИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ АНТИТЕРОРИСТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ

Розглянуті надширокозмугові та багаточастотні просторово-часові надкороткі сигнали стосовно можливості функціонального ураження цифрових комунікаційних мереж. Отримані розрахункові дані для проведення порівняльного аналізу ймовірності деградації інтегральних схем при використанні обох типів сигналів. Проведено порівняльний аналіз імовірнісних характеристик функціонального ураження, залежно від типу сигналу і кількості імпульсів у паці.

К л ю ч о в і с л о в а: надширокозмуговий, багаточастотний просторово-часовий, функціональне ураження, ймовірність деградації.

Постановка проблеми. В наш час у розвитку телекомунікаційних технологій спостерігається інтенсивне використання нового типу радіохвиль – надкоротких електромагнітних імпульсів тривалістю 0,1...1 нс. Результатом їх впливу на комп'ютери та цифрові пристрої є наведення в їхніх колах сигналів, аналогічних робочим, що порушує роботу цифрових комунікаційних систем та мереж. Відносна простота виготовлення потужних пересувних випромінювачів надкоротких імпульсів дозволяє прогнозувати можливість їх використання в терористичних акціях з метою порушення роботи комп'ютеризованих державних інфраструктур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порушення роботи електронних пристроїв можливе шляхом їхнього функціонального ураження. Під функціональним ураженням (ФУ) розуміють такий вплив електромагнітного імпульсу, за якого відбувається незворотний вихід з ладу окремих елементів або функціональних пристроїв.

Створення засобів функціонального ураження на основі надкоротких імпульсів можливе у разі використання надширокозмугових (НШС) сигналів [1] або шляхом фокусування електромагнітної енергії за рахунок створення багаточастотних просторово-часових сигналів (БЧ ПЧС) [2].

Під НШС (рис. 1, а) розуміють сигнал наносекундної тривалості з великою відносною шириною спектра ($\Delta f / f_{сер} \approx 1$, Δf – ширина спектра зондуючого сигналу, $f_{сер}$ – середня частота). Зазначимо, що роботи, пов'язані з практичним використанням НШС сигналів, добре відомі, наприклад [3].

Багаточастотні просторово-часові сигнали (рис. 1, б) є сукупністю гармонійних сигналів, які випромінюються окремими випромінювачами фазованої антенної решітки.

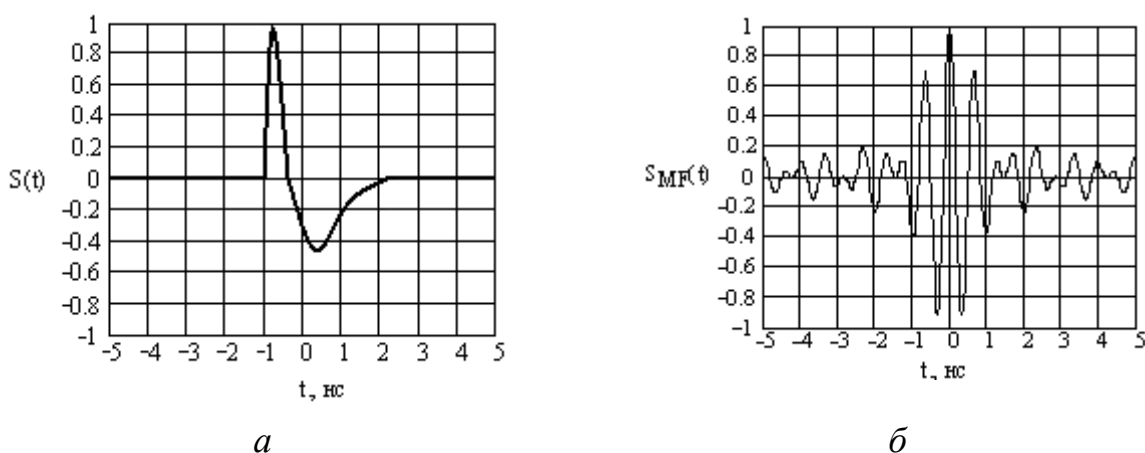


Рис. 1. Надширокозмуговий (а) і багаточастотний просторово-часовий (б) сигнали

З погляду на структури полів зазначені відмінності, насамперед, обумовлені їх спектральними характеристиками: НШС сигнали не мають високочастотного заповнення, їхній спектр теоретично може бути в області частот 0...10 ГГц (на практиці обмежуються смугою пропускання випромінюючих систем, які “вирізають” низькочастотні складові сигналу); багаточастотні радіоімпульси генеруються на визначеній несучій частоті, їх спектр може займати будь-яке місце в межах усього радіочастотного діапазону.

Через відмінності наведених типів сигналів виникають особливості ФУ цифрових комунікаційних мереж у разі їх застосування. Основною особливістю будь-якої мережі є те, що її компоненти розподілені в просторі, а зв'язок між ними фізично здійснюється за допомогою мережевих з'єднань, що реалізовані у вигляді структурованих систем (коаксіал, вита пара, оптичне волокно і т. ін.).

Метою статті є проведення порівняльного аналізу ймовірнісних характеристик ФУ цифрових комунікаційних мереж у випадку застосування НШС та БЧ ПЧС.

Виклад основного матеріалу. У разі ФУ мають місце два варіанти деградації інтегральних мікросхем: теплова модель [4] і модель накопичення пошкоджень [5].

Аналіз великого числа експериментів [5] показує, що значну роль у оцінюванні рівнів пошкоджень напівпровідникових елементів відіграє режим впливу (моноімпульсний або пачечний). За високої частоти повторення цей ефект зазвичай пояснюють накопиченням тепла від імпульсу до імпульсу. Також необхідно, щоб період послідовності був близький до часу релаксації p - n переходу напівпровідникового елемента. Однак ефект деградації спостерігається і у тому випадку, коли період пачки значно більше теплових сталих – модель накопичення пошкоджень [6]. В цій моделі передбачається, що під дією одного імпульсу відбувається незначна локальна зміна структури, наприклад, утворення дефекту. Вихід приладу з ладу спостерігатиметься у разі досягнення деякого критичного числа дефектів.

Після аналізування графіків (див. рис. 1) впливає, що за умови однаковості параметрів послідовності надкоротких сигналів (тривалість імпульсу, шпаруватість) для НШС сигналів більш фізичною можна вважати теплову модель деградації електронних компонентів, для БЧ ПЧС – модель накопичення пошкоджень.

У обох випадках вважатимемо, що енергія послідовності E_a має рівномірний розподіл (це характерно для інтегральних мікросхем) у діапазоні $E_0 \leq E_a \leq E_0 + \Delta E$. Тоді ймовірність ФУ матиме вигляд [6]:

$$P = \begin{cases} 0, & \text{за умови } k_B T [\delta + \ln(\eta)] \leq E_0; \\ \frac{k_B T [\delta + \ln(\eta)] - E_0}{\Delta E}, & \text{за умови } E_0 \leq k_B T [\delta + \ln(\eta)] \leq E_0 + \Delta E; \\ 1, & \text{за умови } k_B T [\delta + \ln(\eta)] > E_0 + \Delta E, \end{cases}$$

де k_B – стала Больцмана; T – температура p - n переходу, що змінюється під дією послідовності надкоротких імпульсів;

$$\eta(N, T_{ПВС}, \gamma) = \frac{1 - \exp(-\gamma N T_{ПВС})}{\exp(-\gamma T_{ПВС})} \exp(-\gamma T_{ПВС} + \gamma \tau_{ПВС});$$

γ – релаксаційний параметр, що описує процес відновлення напівпровідникової структури; N – кількість імпульсів; $\tau_{ПВС}$ – тривалість імпульсу.

Величина $\Delta T_{кр}$ для різних p - n переходів з напругою лавинного пробоя 7...9 В, складає 350...500 °С. На рис. 2 представлена залежність імовірності ФУ напівпровідникового елемента P для рівномірного закону розподілу від числа імпульсів у пачці N для $\delta = 3$; $\gamma = 10^{-4}$.

Графік 1 відповідає $\Delta E/E_0 = 1$, $T_{ПВС} = 250$ нс, $\tau_{ПВС} = 5$ нс, $E_0/k_B T(\tau_{ПВС}) = 10$; графік 2 відповідає $\Delta E/E_0 = 0,5$, $T_{ПВС} = 250$ нс, $\tau_{ПВС} = 10$ нс, $E_0/k_B T(\tau_{ПВС}) = 10$; графік 3 відповідає $\Delta E/E_0 = 0,3$, $T_{ПВС} = 250$ нс, $\tau_{ПВС} = 10$ нс, $E_0/k_B T(\tau_{ПВС}) = 5$, $\Delta E/E_0 = 0,25$; графік 4 відповідає $T_{ПВС} = 250$ нс, $\tau_{ПВС} = 10$ нс, $E_0/k_B T(\tau_{ПВС}) = 5$.

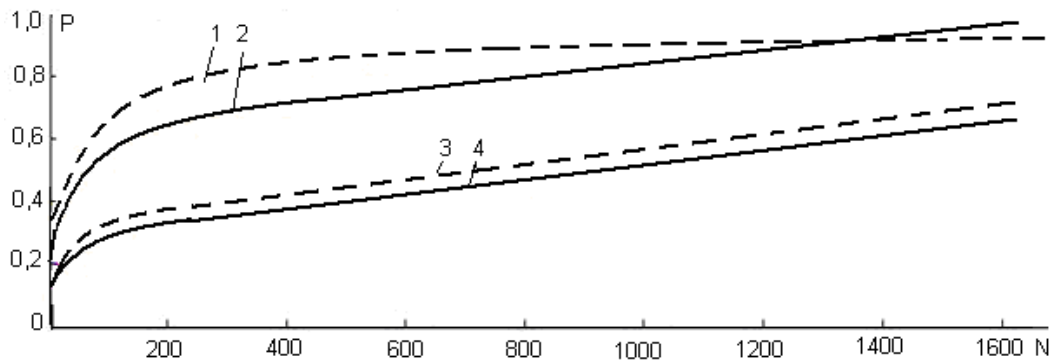


Рис. 2. Залежність ймовірності ФУ p - n переходу від кількості імпульсів у пачці N для рівномірного закону розподілу E_a

Аналіз рис. 2 показує, що із збільшенням кількості імпульсів ймовірність ФУ p - n переходу наближається до свого граничного значення. Якщо використовувати НШС сигнали з періодом їх слідування у пачці менше часу релаксації, то ФУ елементів може відбутися вже при 800...1 000 імпульсах у пачці. У випадку БЧ ПЧС енергія одиночного сигналу (з урахуванням бічних пелюсток) менше, і деградація настає при 1 600...2 000 імпульсах за наведених вище значення енергії сигналу.

Результати розрахунків показали, що для підвищення ймовірності ФУ цифрових комунікаційних мереж послідовністю сигналів доцільно використовувати БЧ ПЧС, що дозволяє на великих дальностях “заповнити” діаграму спрямованості антени набором сфокусованих сигналів, кожний з яких спричинює локальний дефект p - n переходу. Кількість сигналів буде тим більшою, чим меншою є шпаруватість послідовності: якщо $Q = 25$, то достатньо 800 імпульсів, при цьому ймовірність ФУ збільшиться майже на 8 %, порівняно з тією ж кількістю НШС сигналів; якщо $Q = 16$, то ймовірність ФУ збільшиться на 12 % (див. рис. 2).

Висновки

У роботі проведений порівняльний аналіз ймовірності ФУ цифрових комунікаційних мереж у випадку застосування НШС сигналів і БЧ ПЧС. Для підвищення ймовірності ФУ цифрових комунікаційних мереж шляхом використання послідовності сигналів на великих дальностях доцільно використовувати БЧ ПЧС, на малих – НШС сигнали.

Список використаних джерел

1. Лазоренко, О. В. Сверхширокополосные сигналы и процессы [Текст] : монография / О. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор. – Х. : ХНУ, 2009. – 576 с.
2. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ [Текст] / под ред. В. И. Гомозова. – Х. : Городская типография, 2011. – 330 с.
3. Генератор мощных наносекундных импульсов [Текст] : пат. 1804271 Рос. Федерация : SU 1804271 A1. 6 Н03К3/53 / И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев ; заявитель и патентообладатель Физико-технический ин-т им. А. Ф. Иоффе. – № 4930490/21; заявл. 24.04.91; опубл. 27.06.96, Бюл. № 10/2002.
4. Панов, В. В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения [Текст] / В. В. Панов, А. А. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10. – С. 22–24.
5. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы [Текст] / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37–52.
6. 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, 20 сент. 1999. – С. 329–330.

Стаття надійшла до редакції 07.06.2012 р.