

УДК 621.396.677

М.М. Ясечко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ОГЛЯД МЕХАНІЗМІВ ДЕГРАДАЦІЇ РАДІОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ПРИДАВЛЕННІ

*У статті визначені переваги засобів функціонального придавлення і поразки (ФПП) перед традиційно використовуваними вогневими засобами при застосуванні малорозмірних засобів повітряного нападу. Розглянуті основні механізми ФПП при фокусуванні електромагнітного поля від рознесених радіотехнічних систем. Визначено, що найменше вивченим механізмом ФПП є ефект «замикання».*

**Ключові слова:** функціональне придушення і поразка, фокусування, деградація радіоелементів.

### Вступ

Огляд літератури. Аналіз останніх військових конфліктів показує, що на сьогоднішній день найбільш небезпечними для об'єктів, що захищаються військами ППО Сухопутних військ, є високошвидкісні і маловисотні цілі, для знищення яких вогневими засобами ППО недостатньо часу, а також цілі з малою ефективною поверхнею розсіювання (протирадіолокаційні ракети (ПРР), крилаті ракети і безпілотні літальні апарати (БПЛА)) [1, 2]. Одним з перспективних способів боротьби з такими засобами повітряного нападу (ЗПН) є функціональне придавлення і поразка їхніх радіоелектронних систем (РЕС.)

Малий час реакції засобів ФПП, який визначається часом установки необхідного фазового розпо-

ділу по апертурі випромінюючої антени, прийнятна дальність дії, на якій можливе досягнення необхідного рівня щільності потоку потужності для ефективною дії на елементну базу радіоелектронних пристроїв ЗПН визначають переваги засобів ФПП перед вогневими засобами поразки.

Результатом дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ) на РЕС з метою рішення задачі ФПП можуть бути деградація найбільш чутливих до енергетичних перевантажень або до польового пробую [3, 4] радіоелектронних елементів, що приводить до повної або часткової втрати працездатності основних функціональних пристроїв РЕС. Як правило, перевага віддається ЕМІ малої тривалості (від долей до десяти наносекунд) і великої потужності (від сотень мегават до одиниць гігават).

**Метою статті** є огляд механізмів деградації радіокомпонентів при функціональному придувленні.

Можливі два варіанти дії таких ЕМІ на РЕС при рішенні задач ФПП: внутрішньосмугове або позасмугове придувлення [3]. Внутрішньосмугові способи ФПП є енергетично найбільш вигідними, але вимагають початкових даних про технічні ха-

рактеристики РЕС, що вражаються або придушуються: про робочу частоту і смугу пропускання приймальних пристроїв, тактову частоту спецобчислювачів, що управляють, і т.д.

У табл. 1 приведені основні радіотехнічні характеристики керованої ракетної зброї класу "повітря-земля" і ударних БПЛА [2, 3].

Таблиця 1

Основні радіотехнічні характеристики керованої ракетної зброї класу "повітря-земля"

Тип ПРП	AGM-45A "Шрайк"	AGM-88A "ХАРМ"	AGM-78A "Стандарт-АРМ"	AS-37 "Мартель"	MRASM	LRASM
Система наведення	Пасивна РЛ ГСН; діапазонна	Пасивна РЛ ГСН	Пасивна РЛ ГСН	Активно-пасивна РЛ ГСН; діапазонна	Інерц. + "Терком"; РЛ висотомір; ГСН	Інерц. + "Терком"; імп.-допл. РЛС
Діапазон робочих частот, МГц	1550 – 9600	500 – 20000	500 – 20000	500 – 20000	3900 – 6200; 4300 – 13000 35000	3900 – 6200; 4300 – 13000
Тип антени	4 щільових антени	Широкопол. дзеркальна	Широкопол. логарифміч. спіральна	Узкопол. щільова	Широкопол. дзеркальна	Хвилеводно-щільова АР
Розміри антени, м	0,2	0,32	0,34	0,4	0,35 – 0,45	1,5 – 2,5

Таблиця 2

Основні радіотехнічні характеристики ударних БПЛА

Тип БПЛА	BQM-74C "Чукар-3"	BGM-34E "Локаст"	R4E-70 "Скайай"	CGM-121 "Пейв Тайгер"	PAД/KDAR	"Мірах"300	"Мірах"600
Система управління	Прогр.	Комб.	Комб.	Прогр.	Прогр.	Комб.	Комб.
Діапазон робочих частот, МГц	4300 – 13000	4300 – 13000	400 – 850	1550 – 9600	400 – 850; 15350 – 17250	1575,5; 1227,6	4300 – 13000
Тип антени	Хвилеводно-щільова	Лінійка вібраторів	Дзеркальна	Логарифм. спіральна	Щільова; дзеркальна	Дзеркальна	Лінійка вібраторів
Розміри антени, м	0,5 – 1,2	1,5 – 2,5	0,6	0,5	0,8; 0,45	0,5	1,6 – 2,8

Втрати енергії впливаючого ЕМІ при проходженні через вхідні кола приймача РЕС в даному випадку залежать від співвідношення між смугою пропускання приймального тракту і шириною спектру впливаючого сигналу. В більшості випадків ці втрати не перевищують – (10...15) дБ [3].

Позасмугові способи ФПП не вимагають початкових даних по робочий діапазон частот і ряду інших технічних характеристик РЕС, що вражаються. Дія на приймальні пристрої РЕС здійснюється на будь-яких частотах поза їх смугами пропускання, якщо в них використовуються коаксіальні лінії передачі. Якщо в приймальних пристроях на входах використовуються хвилеводні фідерні тракти, то частота впливаючого ЕМІ  $f_b$  повинна вибиратися

вище за критичні частоти хвилеводних трактів  $f_{кр}$ . Для оцінок необхідної потужності ЕМІ в даному випадку доцільно використовувати результати спеціальних експериментальних досліджень по стійкості конкретного типу пристроїв до дії ЕМІ малої тривалості і великої потужності. Втрати енергії впливаючого ЕМІ при позасмуговій дії можуть досягати – (30...40) дБ [3].

В даний час відомі три основних напрями реалізації засобів ФПП з малою тривалістю потужних імпульсів, що принципово відрізняються: на основі іскрових і плазмових генераторів відеоімпульсів і СВЧ радіоімпульсів; на основі релятивістських генераторів НВЧ радіоімпульсів; на основі НВЧ передавальних фазованих антен-

них решіток з фокусуванням електромагнітного випромінювання [3, 5,6].

Засоби ФПП, що відносяться до першого і другого напрямків їх створення, забезпечують найбільшу потужність на один зразок, але не володіють властивостями електромагнітної сумісності (ЕМС) з іншими РЕС, а також можуть придушувати всі РЕС, які не підлягають ФПП, але знаходяться ближче ніж вражаюча РТС. Крім того, вони вимагають для їх реалізації створення принципово нових генераторних і антенно-фідерних пристроїв.

Засоби ФПП, що відносяться до третього напрямку, володіють умовною скритністю, властивостями ЕМС і можуть бути реалізовані з використанням існуючої елементної бази для генераторних і антенно-фідерних пристроїв. Для підвищення потужності і досягнення необхідних значень пікової щільності потоку потужності в області простору, де знаходиться рухома або нерухома РЕС, при недостатній потужності окремого зразка засобу ФПП можна здійснювати фокусування ЕМІ за допомогою антенних систем рознесених РТС.

Огляд літератури щодо фізичних процесів в РЕС при дії на них могутніх коротких імпульсів дозволяє виділити наступні основні механізми деградації елементів РЕС.

Перший з них пов'язаний з наведенням на конструктивних елементах (відводи напівпровідникових елементів, смужки печатних плат і т.д.) НВЧ-потужності, яка у свою чергу приводить до електричних перевантажень («антенний ефект»). В цьому випадку значення амплітуд електричних сигналів, що наводяться в контурах схем, в основному визначаються наступними чинниками [7]:

- параметрами сигналу (потужністю частотою заповнення, тривалістю імпульсу);
- геометричними розмірами і конструктивними особливостями елементів, їх взаємною орієнтацією;
- електричним режимом роботи схем;
- конструктивним розташуванням монтажу схем відносно корпусу апаратури і т.д.

Для цього випадку критичні значення напруженості електричного поля лежать в межах  $E_{кр} = 10^5 \div 10^6$  В/см.

Другий механізм пов'язаний з безпосередньою взаємодією імпульсу із структурою напівпровідникового елементу: тепловий вторинний пробій, струмовий вторинний пробій і ефект «замикання». Відзначимо, що найменше вивченим є останній ефект.

При електричному замиканні (ефект  $dU/dt$ ) формування активних елементів в об'ємі провідної підложки приводить у ряді випадків до виникнення паразитних 4-шарових структур, які можуть вмикатися на зразок тиристора при дії електричних імпульсних сигналів. Типовим проявом є різке збільшення струму в колі живлення, вхідних або вихідних колах. Різке збільшення напруги (із швидкістю 0,1 – 10 В/нс) здатне викликати «замикання», навіть

якщо максимальна напруга дії не перевищує допустиму по паспорту.

Така дія може бути не тільки наслідком перешкод, що створюються зовнішніми діями, але і наведеними сигналами від сусідніх елементів по колу живлення.

Працездатність радіоеlementу при виникненні ефекту порушується і не відновлюється після закінчення дії. Відключення живлення іноді дозволяє ліквідувати замикання. Із-за протікання великих струмів може відбутися вигорання металізації або тепловий пробій внутрішніх напівпровідникових структур.

Для аналізу стійкості інтегральних мікросхем (ІМС) до ефекту  $dU/dt$  зазвичай використовують ті ж параметри, що і при аналізі замикання тиристорів, які визначають характерні точки S-подібної вольт-амперної характеристики (ВАХ):  $I_{ак}, U_{ак}$  – струм і напруга активізації;  $I_{ут}, U_{ут}$  – струм і напруга утримання;  $I_3, U_3$  – залишковий струм і напруга після замикання;  $E_{кр} = dU/dt$  – критична швидкість наростання фронту або спаду впливаючого імпульсу.

У [7] проаналізовані домінуючі механізми відмов в напівпровідникових пристроях при дії короткоімпульсного ЕМІ. Розглянутий вплив характеристик сигналів на деградацію діодних структур, біполярних транзисторів, польових транзисторів із затвором Шотки, інтегральних аналогових і цифрових мікросхем. Через стрімкий розвиток цифрової обчислювальної техніки, що застосовується в зразках озброєння, окремий інтерес представляють цифрові мікросхеми (ЦМС).

На основі аналізу наявних експериментальних даних показано, що даний тип схем чутливіший до радіочастотних сигналів, що поступають на вхід, ніж ІМС. Тому, дія може бути змодельована за допомогою еквівалентного генератора напруги Тевеніна з відповідним імпедансом. У роботі [8] проведений аналіз впливу RFI (Radio Frequency Interference) ефектів на характеристики елементів І-НІ серії 7400, де показано, що логічні перебування на виході для всіх типів схем в різних конструктивних схемах порушуються при потужності впливаючого сигналу 6...16 дБ, якнайгірший випадок спостерігається для вихідного опору еквівалентного генератора, рівного 50 Ом.

В результаті мікроскопічного аналізу пошкоджених структур [9] було встановлено, що в біполярних ЦМС домінуючим результатом теплової нестабільності в структурі є закорочення переходів емітер-база вхідних транзисторів, захисних діодів, а також пробій колектор-емітер вихідних транзисторів, що зрештою приводить до проплавлення структури. Пошкодження металізації менш ймовірно і настає, як правило, з наступних причин:

- розсіювання енергії у вузьких областях металізації при коротких, достатньо потужних імпульсах;

– розсіювання енергії у великих за площею перетину дифузійних резисторах або закорочених переходах, що викликає плавлення металізації при довгих впливаючих імпульсах.

Формування активних елементів мікросхеми в об'ємі напівпровідникової підложки приводить до виникнення паразитних 4-х шарових структур, які можуть переходити в низькоімпедансний стан при дії електричних імпульсних сигналів.

Чотиришарова структура має S-образну ВАХ, яка властива для тиристорів. Три основні ділянки ВАХ описують поведінку структури: високоомний, низькоомний, з негативним опором.

Критерій стійкості ІМС до ефекту  $dU/dt$  на електричному рівні витікає з аналізу S-образної динамічної ВАХ:

$$\begin{cases} U_n > U_{ак}; \\ \frac{U_n - U_{ак}}{R_n} \geq I_{ак}; \\ \frac{\Delta U}{\Delta t} > E_{кр}, \end{cases}$$

де  $U_n$  – амплітуда імпульсу завади;  $R_n$  – еквівалентний опір генератора завади.

При  $(U_n - U_{уд})/R_n \geq I_{уд}$  ефект має залишковий характер.

### Висновки

Визначені переваги засобів ФПП перед традиційно використовуваними вогневими засобами для боротьби з малорозмірними та високошвидкісними ЗПН. Проаналізовані основні радіотехнічні характеристики ПРР і БПЛА. Розглянуті основні механізми ФПП при фокусуванні електромагнітного поля від рознесених РТС. З огляду літератури витікає, що причиною катастрофічних необоротних відмов в більшості випадків є тепловий вторинний пробій, а також шнування струму, що приводить до проплавлення структури і руйнування металізації в локальних областях. Ефекти, пов'язані з тепловим вторинним пробієм, в першому наближенні можуть бути оцінені за допомогою моделі Вунша-Белла-Таска. Найменше вивченим механізмом ФПП є

ефект «замикання», при якому формуються активні елементи в об'ємі провідної підложки, що приводить у ряді випадків до виникнення паразитних 4-шарових структур, які можуть включатися на зразок тиристора при дії електричних імпульсних сигналів.

### Список літератури

1. Горелов А.В. Югославия – полигон для проверки эффективности вооружений НАТО / А.В. Горелов // *Зарубежное военное обозрение*. – 1999. – № 6. – С. 55-56.
2. Небабин В.Г. Защита РЛС от противорадиолокационных ракет / В.Г. Небабин, И.Б.Кузнецов // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1990. – № 5. – С. 67-81.
3. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения / В.В. Панов, А.П. Саркисян // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1993. – № 10-12. – С. 6-8.
4. Воздействие на различные объекты СВЧ излучения большой мощности // *Радиотехника и связь, экспресс информация, ВИНТИ*. – 1995. – № 9. – С. 9-10.
5. Гомозов В.И. Фокусировка электромагнитного излучения на основе пространственно-фазо-частотно-временного управления сигналами в ФАР и разнесенных системах излучателей / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, С.В. Титов // *Сб. научн. трудов по материалам 1-го Международного радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития"*. МРФ-2002 (8 – 10 октября 2002 г.) Ч.2. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – С. 435-438.
6. Гомозов В.И. Пространственно-фазово-частотная фокусировка сигналов в цилиндрических ФАР при V-образной дискретизации частот / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов, А.А. Лоскутов, С.В. Титов // *Все-укр. межвед. научно-техн. сб. Радиотехника*. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – Вып. 127. – С. 42-49.
7. Антипин В.В. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин, В.А. Годовицын, Д.В. Громов // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1995. – № 1. – С. 37-53.
8. Whalen J.J. Computer-aided analysis of RFI effects in digital integrated circuits / J.J. Whalen, J.G. Tront, C.E. Larson // *IEEE Trans.* – 1979. – Vol. EMC-21, № 4. – P. 291-297.
9. Jenkins C.R. EMP susceptibility of integrated circuits / C.R. Jenkins, D.L. Durgin // *IEEE Trans.* – 1975. – Vol. NS-22. – P. 2494-2499.

Надійшла до редколегії 9.11.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук., проф. Г.В. Єрмаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ ДЕГРАДАЦИИ РАДИОЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПОДАВЛЕНИИ

М.Н. Ясечко

*В статье определены преимущества средств функционального подавления и поражения (ФПП) перед традиционно используемыми огневими средствами при применении малоразмерных средств воздушного нападения. Рассмотрены основные механизмы ФПП при фокусировке электромагнитного поля от разнесенных РТС. Определено, что наименее изученным механизмом ФПП является эффект «защелкивания».*

**Ключевые слова:** функциональное подавление и поражение, фокусировка, деградация радиоэлементов.

### REVIEW OF RADIOELEMENTS DEGRADATION MECHANISMS AT FUNCTIONAL SUPPRESSION

M.N. Yasechko

*In the article advantages of facilities of functional suppression and defeat (FSD) are certain before the traditionally in-use weapons of fires at application of facilities of littlesizes of air attack. The basic mechanisms of FSD are considered at focusing of the electromagnetic field from carried RTS. It is certain that the least studied mechanism of FSD is an effect of «snapping» to.*

**Keywords:** functional suppression and defeat, focusing, degradation of radioelements.