

УДК 621.396.677

М.М. Ясечко¹, О.Л. Кузнецов¹, О.В. Тесленко²¹Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків²Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків

АЛЬТЕРНАТИВНІ МЕТОДИ ЗНИЩЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ

У статті визначені переваги засобів функціонального придушення і поразки (ФПП) перед традиційно використовуваними вогневими засобами при застосуванні малорозмірних засобів повітряного нападу – БПЛА. 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

Аналіз застосування засобів повітряного нападу (ЗПН) [1, 2] показує зростаючу роль застосування БПЛА (дронів) при веденні бойових дій у сучасних локальних конфліктах. Досвід бойових дій в зоні антитерористичної операції (АТО) «на Донбасі» в Україні показує, що на сьогоднішній день найбільш небезпечними для угруповань та бойових порядків військ є мікро та міні БПЛА ближньої дії та легкі БПЛА малого та середнього радіусів дії, що виконують роль розвідки бойових порядків військ та корегування вогню артилерії, мінометів та реактивних систем залпового вогню. Знищення БПЛА існуючими вогневими засобами ППО малоефективне в зв'язку з недостатнім часом обстрілу та розкриттям вогневих позицій засобів ППО. Застосування стрілецького озброєння ускладнено внаслідок малого розміру дронів. На думку авторів, найбільш ефективним засобом знищення БПЛА цих класів є застосування електромагнітної зброї з безпосереднім впливом електромагнітного випромінювання (електро-магнітного імпульсу – ЕМІ) на БПЛА з метою ураження або придушення їхнього бортового радіоелектронного обладнання. В узагальненому вигляді можна віднести цю зброю до засобів ФПП.

Малий час реакції засобів ФПП, який визначається часом установки необхідного фазового розподілу по апертурі випромінюючої антени, прийнятна дальність дії, на якій можливе досягнення необхідного рівня щільності потоку потужності для ефектвної дії на елементну базу радіоелектронних пристроїв БПЛА визначають основні переваги засобів ФПП перед вогневими засобами поразки.

Виклад основного матеріалу

З метою рішення задачі ФПП, результатом дії ЕМІ на РЕС бортового обладнання дрону можуть бути деградація найбільш чутливих до енергетичних переважань або до польового пробую [3, 4] радіоелектронних елементів, що приводить до повної або часткової втрати працездатності основних фун-

кціональних пристроїв РЕС. Як правило, перевага віддається ЕМІ малої тривалості (від доль до десяти наносекунд) і великої потужності (від сотень мегават до одиниць гігават).

Можливі два варіанти впливу ЕМІ на радіоелектронні системи (РЕС) бортового обладнання при вирішенні задач ФПП: внутрішньосмугове або позасмугове придушення [3]. Внутрішньосмугові способи ФПП є енергетично найбільш вигідними, але вимагають знання основних технічних характеристики РЕС БПЛА, що вражаються або придушуються, – робочу частоту і смугу пропускання приймальних пристроїв, тактову частоту спец обчислювачів управління і т.п. Втрати енергії 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 робочому діапазону частот та інших технічних характеристик бортового обладнання, що уражаються. Дія на приймальні пристрої РЕС бортового обладнання відбувається 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_v 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 пере-

давальних фазованих антенних решіток з фокусуванням електромагнітного випромінювання [3, 5].

Засоби ФПП, що відносяться до першого і другого напрямків побудови, забезпечують найбільшу потужність ЕМІ на один зразок, але не забезпечують електромагнітної сумісності (ЕМС) з іншими РЕС, а також можуть придушувати всі РЕС, які не підлягають ФПП, але знаходяться ближче ніж вражаюча РТС. Крім того, для їх реалізації необхідно створення принципово нових генераторних і антенно-фідерних пристроїв. Створені засоби ФПП за цими принципами доцільно використовувати безпосередньо в бойових порядках військ в якості мобільних комплексів ураження.

Засоби ФПП, що відносяться до третього напрямку, мають умовну скритність, властиву РЕС і можуть бути реалізовані з використанням існуючої елементної бази генераторних і антенно-фідерних пристроїв. Для підвищення потужності і досягнення необхідних значень пікової щільності потоку потужності в області простору, де знаходиться БПЛА, при недостатній потужності окремого зразка засобу ФПП, можна здійснювати фокусування ЕМІ за допомогою антенних систем рознесених радіотехнічних систем (РТС). Окремі потужні мобільні передавачі можуть бути розташовані в бойових порядках військ, або знаходитись в тактичній глибині.

Рознесені РТС доцільно розміщувати в тактичній глибині військ де їх виявлення буде ускладнено засобами радіотехнічної розвідки за рахунок зниження випромінюваної потужності кожного передавача зі складу системи та неможливості візуальної фіксації передавачів камерами БПЛА.

Аналіз [5] щодо фізичних процесів в РЕС при дії на них потужних 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 [6]:

- 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, стру-

мовий 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 чотиришарових 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 радіоелементу 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 [6] 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): мікропроцесори, програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС) різних класів та мікросхем жорсткої логіки.

На основі аналізу наявних експериментальних даних з'ясовано, що даний тип схем більш чутливий до радіочастотних сигналів, що поступають на вхід, ніж решта ІМС. Тому, дія ЕМІ може бути змодельована за допомогою еквівалентного генератора напруги Тевеніна з відповідним імпедансом. У роботі [7] 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 сигналу, що впливає, у $6...16$ дБ, якнайгірший випадок спостерігається для вихідного опору еквівалентного генератора, рівного 50 Ом.

В результаті мікроскопічного аналізу пошкоджених структур [8] 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 наступає, 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 чотиришарових 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:

$$U_n > U_{ак} \cdot \frac{U_n - U_{ак}}{R_n} \geq I_{ак} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} > E_{кр},$$

де U_n – амплітуда імпульсу перешкоди; R_n – еквівалентний опір генератора перешкоди.

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

Висновки

Визначені переваги засобів ФПП перед традиційними вогневими засобами боротьби з малорозмірними та високошвидкісними БПЛА.

Розглянуті основні механізми ФПП при фокусуванні електромагнітного поля від рознесених РТС.

Причиною катастрофічних необоротних відмов активних радіоелементів РЕС після дії потужного ЕМІ в більшості випадків є тепловий вторинний пробій, а також шнуровання струму, що приводить

до проплавлення структури і руйнування металізації в локальних областях. Ефекти, пов'язані з тепловим вторинним пробоем, в першому наближенні можуть бути в подальшому оцінені за допомогою моделі Вунша-Белла-Гаска.

Потребує додаткового експериментального дослідження процес ініціалізації ефекту «замикання» при впливі потужного ЕМІ, при якому формуються активні елементи в об'ємі провідної підложки, що призводить у ряді випадків до виникнення паразитних чотиришарових структур і як наслідок – руйнації напівпровідникового переходу.

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*. – № 10-12, 1993.
4. Воздействие на различные объекты СВЧ излучения большой мощности // *Радиотехника и связь, экспресс информация, ВИНТИ*, №9, 1995. – С. 25-31.
5. 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 // *Всеукр. межвед. научно-техн. сб. Радиотехника*. – Х.: ХНУРЭ, 2002. – Вып. 127. – С. 42-49.
6. 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.
7. 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.
8. 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 22.08.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Єрмаков, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПОРАЖЕНИЯ МАЛОРОЗМЕРНЫХ СРЕДСТВ ВОЗДУШНОГО НАПАДЕНИЯ

М.Н. Ясечко, А.Л. Кузнецов, О.В. Тесленко

В статье определены преимущества средств функционального подавления и поражения (ФПП) перед традиционно используемыми огневими средствами при применении малоразмерных средств воздушного нападения – БПЛА. 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.

ALTERNATIVE METHODS OF DESTRUCTION SMALL AIR ATTACK

M.N. Yasechko, A.L. Kuznetsov, O.V. Teslenko

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 little sizes 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.