

УДК 537.876.4

Р.Г. Сидоренко, В.А. Лупандін, А.В. Челпанов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ЗАХИСТ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ ВІД ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

*Розглянуті існуючі методи захисту радіоелектронних засобів від електромагнітних випромінювань. Запропоновано використання радіопоглинаючого покриття на основі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями для пасивного захисту радіоелектронних засобів та їхніх з'єднань з зовнішніми джерелами від потужного електромагнітного випромінювання за рахунок створення шарів твердотільної та газорозрядної плазми.*

**Ключеві слова:** електромагнітне випромінювання, пасивний захист, радіоелектронні засоби.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Працездатність радіоелектронних засобів (РЕЗ) в значній мірі визначається чутливістю до короткочасних перевантажень, що виникають в результаті перехідних процесів. Основними джерелами таких процесів є різні пристрої (індуктори, мотори, генератори, реле і ін.), розряди статичної електрики і наведені електромагнітні випромінювання (ЕМВ) іншої природи.

Найбільш небезпечним по своїй дії на РЕЗ є потужне електромагнітне випромінювання короткої і ультракороткої тривалості імпульсу, яке здатне забезпечити виведення з ладу РЕЗ на відстанях від десятків до сотень кілометрів. Тому завдання забезпечення стійкості і надійності сучасних радіоелектронних засобів до дії потужних електромагнітних випромінювань короткої і ультракороткої тривалості імпульсу має яскраво виражений системний, комплексний характер, як в технічному, так і в організаційному відношеннях. Це обумовлено тим, що вплив ЕМВ виражається не лише безпосередньою дією полів на елементи і вузли радіоапаратури, але і дією імпульсної напруги і струмів, що наводяться електромагнітним полем в дротах і кабелях, на елементи входів радіоелектронної апаратури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх публікацій показав про поширення робіт в провідних країнах світу зі створення електромагнітної зброї (ЕМЗ), яка є цілком закономірною формою боротьби за перевагу в майбутніх війнах та збройних конфліктах [1, 2]. Ця перевага досягається за рахунок впливу електромагнітного поля на різноманітні об'єкти – перш за все, на високотехнологічне обладнання радіоелектронних систем (радіолокаційних, навігаційних, оптико-електронних, обчислювальних тощо) військового та загального призначення.

Тому одним з пріоритетних напрямків розвитку озброєння та військової техніки є розробка та створення засобів захисту від ЕМЗ.

**Мета статті.** Оцінити використання радіопоглинаючого покриття на основі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями для захисту радіоелектронних засобів від потужних електромагнітних випромінювань.

### Основна частина

На сьогоднішній день існують наступні методи захисту радіоелектронних засобів від потужних електромагнітних випромінювань: конструкційні, структурно-функціональні та схемотехнічні [3].

Загальний принцип конструкційних методів захисту полягає в поліпшенні екранування апаратури, вибору оптимальних схем заземлення для кожного конкретного випадку [4].

Структурно-функціональні методи полягають у виборі функціональних принципів побудови апаратури і структури сигналів [5].

Схемотехнічні методи захисту полягають у цілеспрямованій зміні структури окремих схем або введення в них додаткових елементів (захисних пристроїв) для ослаблення впливу ЕМВ на нормальне функціонування радіоприймальних пристроїв [6].

Правильність вибору та застосування захисних пристроїв є одною з головних умов, яка забезпечує потрібні технічні і експлуатаційні характеристики РЕЗ, їх надійність в умовах дії потужного ЕМВ.

Серед безлічі захисних пристроїв, які можуть бути використані для захисту вхідних ланцюгів радіоприймального тракту від електромагнітного випромінювання, можна виділити три основні типи: газорозрядні, напівпровідникові та їх комбінації, а також вакуумні.

З впровадженням новітніх технологій стали пропонуватися до використання захисні радіопоглинаючі екрани на основі радіопоглинаючих покриттів (РПП). Відомі такі основні типи основі радіопоглинаючих покриттів: плоскосоїсті (інтерференційні), градієнтні, геометрично неоднорідні і компо-

зитні [7, 8]. Найбільш перспективними з РПП є композитні покриття [9].

Запропоновано використання РПП на основі композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями (КМРВ), що дозволить захистити РЕЗ від ЕМВ в розширеному частотному діапазоні. Структура КМРВ приведена на рис. 1.

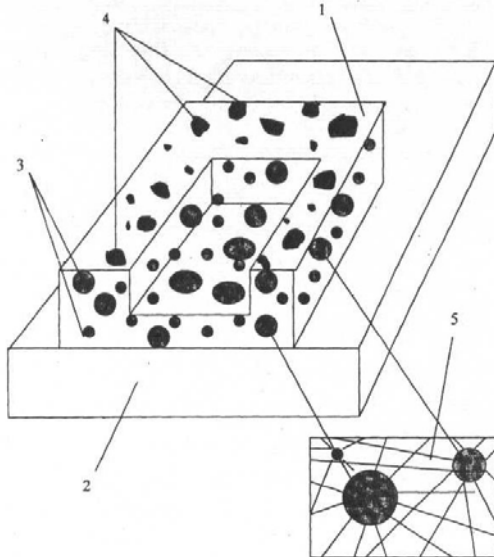


Рис. 1. Структура композитного матеріалу з радіоізотопними включеннями, де:  
1 – діелектричний матеріал; 2 – корпус;  
3 – вкраплення  $\alpha$  – радіоактивної речовини різного розміру; 4 – плями високопровідної речовини різного розміру; 5 – треки  $\alpha$  – часток

Запропоноване покриття на основі КМРВ є двошаровою структурою, що має в своєму складі іонізований повітряний (газоподібний) шар і напівпровідниковий (твердотільний) шар з різними по активності радіоізотопними включеннями.

Електромагнітне випромінювання першим впливає на напівпровідниковий шар покриття (рис. 2), який забезпечує пасивний захист об'єктів в різних частотних піддіапазонах за рахунок використання радіоізотопних включень з різною по величині активністю, яка визначається як числом треків  $\alpha$ -часток, так і макроскопічними властивостями твердотільної плазми (щільність часток, електропровідність, теплопровідність і т. д.), що виникає уздовж треків. Необхідно відзначити, що по мірі видалення від джерела іонізації (радіоізотопного включення) концентрація заряджених часток зменшуватиметься із-за процесів релаксації.

Іонізація атомів речовини покриття уздовж треків приводить до створення неоднорідності в імпульсному просторі, обмеженому розмірами напівпровідникових шарів, і, як наслідок, до утворення нерівноважних станів електронів, що може привести до істотного збільшення загасання ЕМВ в покритті.

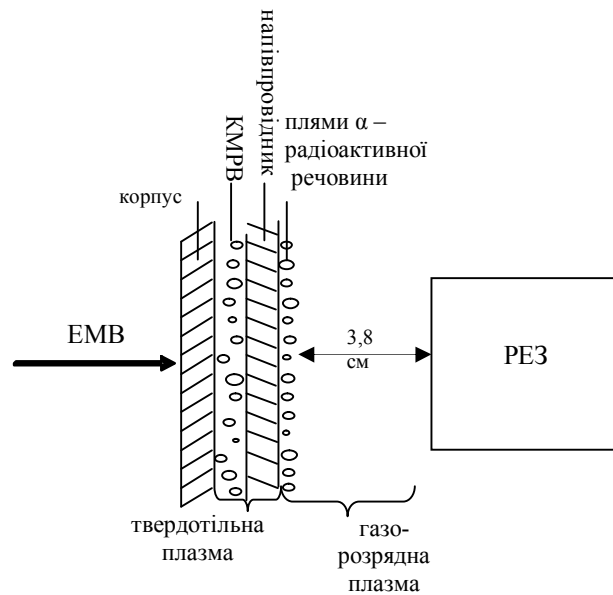


Рис. 2. Структурна схема використання запропонованого покриття для захисту РЕЗ

Причому залежно від величини активності радіоізотопних включень, що визначає механізми іонізації і рекомбінації, дисипативні процеси можуть мати різну природу походження. Крім того, нерівноважний розподіл електронної компоненти твердотільної частини покриття може привести як до зміни дисперсії плазмових коливань, так і до появи уявної частини діелектричної проникності, зростання якої забезпечить збільшення тангенса кута втрат  $\text{tg}\delta$ , а, відповідно, зменшення товщини покриття.

Використання джерел іонізуючого випромінювання для створення неоднорідності в імпульсному просторі твердотільної частини матеріалу нерозривно пов'язане із створенням неоднорідності в координатному просторі – треків  $\alpha$ -часток. Випускаємі радіоізотопними включеннями  $\alpha$ -частки приведуть до утворення в напівпровідниковій (діелектричній) матриці покриття треків. Вони є складною розсіюючою нестаціонарною системою тонких провідних ниток та забезпечують за рахунок своїх резонансних властивостей поглинання ЕМВ.

Таким чином, оскільки основний матеріал покриття (напівпровідник) володіє діелектричними властивостями, а  $\alpha$ -радіоактивні включення мають хорошу провідність, то твердотільна частина запропонованого покриття по відношенню до поглинання ЕМВ буде одночасно середовищем трьох перерахованих вище типів, що реалізуються в традиційних РПП: плоскослоїстих, градієнтних і геометрично неоднорідних.

Оскільки розподіл високопровідних радіоактивних включень в матеріалі покриття має нерегулярний характер, то по відношенню до розподілу провідних елементів середовище є фрактальним. Одні-

єю з основних властивостей такого середовища є інваріантність геометричних і фізичних властивостей в широкому діапазоні зміни масштабів, що показує доцільність використання такої побудови матеріалу в цілях розширення робочого діапазону частот покриття.

Іонізований повітряний шар, прилеглий до напівпровідникового шару матеріалу покриття, виникає за рахунок як радіоактивних плям, що наносяться на його поверхню, так і за рахунок тих, що вилітають з нього  $\alpha$ -часток, викликаних радіоізотопними включеннями.

Ці джерела іонізації приводять до створення самоузгодженої частини покриття за рахунок плавного зменшення у міру видалення від нього концентрації заряджених часток (на інтервалі до максимальної довжини вільного пробігу зарядженої  $\alpha$ -частки в повітрі).

Крім того, вони є джерелами іонізації повітряного середовища, безпосередньо прилеглого до матеріалу, за рахунок створення в ньому нерівноважного стану електронної підсистеми повітряного середовища.

Тому, основна ідея застосування РПП на онові КМРВ для захисту радіоелектронних засобів від потужних електромагнітних випромінювань полягає у створенні і використанні специфічних неоднорідностей фазового простору покриття в цілому, обмеженого розмірами шарів матеріалу, для забезпечення в широкому частотному діапазоні необхідних поглинаючих властивостей. Тобто в основу застосування покриття покладено використання радіоізотопних включень, які дозволять вживати не лише природну неоднорідність, пов'язану з присутністю самих включень, але і ряд додаткових ефектів, а, відповідно, і переваг на основі того, що виникають лінійні області підвищеної провідності – треки; з'являється прилеглий до об'єкту захисту повітряний шар підвищеної іонізації і виникає ефект, пов'язаний з нерівновісністю електронної підсистеми матеріалу уздовж треків.

Оскільки основною характеристикою будь-якого радіопоглинаючого матеріалу є його коефіцієнт відбиття  $R(\lambda, \theta)$ , який істотно залежить від довжини хвилі, вигляду і напряму поширення падаючої хвилі, форми об'єкту, то поглинаючі властивості РПП прийнято характеризувати величиною коефіцієнта відбиття плоскої хвилі  $R_0$ , яка падає нормально на безконечний плоский лист поглинаючого матеріалу [10].

Відомо, що коефіцієнт відбиття від шару визначається відповідно до виразу [11].

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{\text{відб}}}{\dot{E}_{\text{пад}}} = \frac{\dot{Z}_{n_2} - \dot{Z}_{n_1}}{\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}}, \quad (1)$$

а коефіцієнт пропускання визначається таким чином

$$\dot{\tau}_{12} = \frac{\dot{E}_{\text{пр}}}{\dot{E}_{\text{пад}}} = \frac{2\dot{Z}_{n_2}}{\dot{Z}_{n_2} + \dot{Z}_{n_1}}, \quad (2)$$

де  $\dot{E}_{\text{пад}}$  – комплексна амплітуда напруженості електричного поля падаючої хвилі;

$\dot{E}_{\text{відб}}$  – комплексна амплітуда напруженості електричного поля відбитої хвилі;

$\dot{E}_{\text{пр}}$  – комплексна амплітуда напруженості електричного поля хвилі, що пройшла;

$\dot{Z}_{n_1}, \dot{Z}_{n_2}$  – приведені хвилеві опори шарів 1 і 2.

Враховуючи, що для всіх складових структури матеріалу можна прийняти  $\mu = 1$ , тоді у виразах (1)

і (2) замість приведеного хвильового опору  $\dot{Z}_n$  можна використовувати коефіцієнт переломлення  $\dot{n} = \sqrt{\epsilon}$  [12].

Відповідно до роботи [11] показник загасання відбитого випромінювання визначається виразом

$$\gamma = \frac{4\pi}{\lambda} l \alpha, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – уявна частина показника переломлення  $\dot{n} = n - j\alpha$ .

Таким чином, відповідно до виразів (1, 2) коефіцієнт відбиття запропонованого покриття на основі КМРВ –  $R_0$  на довжині хвилі  $\lambda$  визначається діелектричною проникністю  $\epsilon_i$  і провідністю  $\sigma_i$  його шарів.

Кожна з вище визначених складових дає свій вклад в діелектричну проникність, яка в загальному випадку може бути представлена таким виразом:

$$\begin{aligned} \epsilon(\omega, \vec{k}) = & 1 + \epsilon_m + \\ & + \sum_{i=1}^N \delta\epsilon_{ct_i}(\omega, \vec{k}) + \sum_{j=1}^M \delta\epsilon_{nc_j}(\omega, \vec{k}) + \\ & + i \left\{ \frac{4\pi}{\omega} \left[ \sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\epsilon_m$  – діелектрична проникність напівпровідникового шару;

$\sum_{i=1}^N \delta\epsilon_{ct_i}(\omega, \vec{k})$  – вклад в діелектричну проник-

ність стаціонарних і нестаціонарних включень (радіоактивних включень і треків);

$\sum_{j=1}^M \delta\epsilon_{nc_j}(\omega, \vec{k})$  – вклад в діелектричну проник-

ність нерівноважних станів електронних підсистем композитного матеріалу і слабоіонізованого повітряного (газового) середовища;

$$\frac{4\pi}{\omega} \left( \sigma_{\text{eff}}(\omega, \vec{k}) + \alpha_e E^2 \right) - \text{вклад в уявну части-$$

ну діелектричної проникності радіоактивних плям з врахуванням нелінійних складових;

$\alpha_e$  – ефективна нелінійна провідність;

$E$  – середнє електричне поле;

$\omega, \vec{k}$  – частота і хвильовий вектор, відповідно.

Складові діелектричної проникності, що описується виразом (4) є частотно-залежними, що може забезпечити за певних умов необхідні поглинаючи властивості запропонованого покриття з радіоізотопними включеннями в широкому частотному діапазоні.

Ці фізичні механізми визначаються діелектричною проникністю  $\epsilon_i$  і провідністю  $\sigma_j$  його шарів.

## Висновки

Таким чином, запропонований підхід, щодо застосування РПП на основі КМРВ, дозволяє захистити РЕЗ та їхні з'єднання з зовнішніми джерелами від потужного електромагнітного випромінювання за рахунок створення шарів:

твердотільної плазми, яка характеризується величинами одного порядку щодо дійсної та уявної частини діелектричної проникності й дозволяє суттєво ослабити вплив ЕМВ;

газорозрядної плазми, яка виникає при іонізації прилеглого до плям  $\alpha$ -радіоактивної речовини, оточуючого середовища, за рахунок треків  $\alpha$ -часток в результаті нерівноважених процесів.

## Список літератури

1. *Зброя на нетрадиційних принципах дії (стан, тенденції, принципи дії та захист від неї): Монографія / О.П. Ковтуненко, В.В. Богучарський, В.І. Слюсар, П.М. Федоров. – Полтава: ПВІЗ, 2006. – 247 с.*

2. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.

3. Резонансные разрядники антенных переключателей / Д.Я. Ашкенази, В.П. Беляев, Г.И. Бродуленко и др. Под ред. И.В. Лебедева. – М.: Сов. радио, 1976. – 274 с.

4. Голант В.Е. Газовый разряд на СВЧ / В.Е. Голант // УФН, 1958. – Т. 65, № 1. – С. 39 – 69.

5. Лебедев И.В. Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ мощности / И.В. Лебедев, М.В. Семенча // Радиотехника, 2001. – №2. – С. 17–21.

6. Крутов А.В. Защитное устройство малого уровня мощности / А.В. Крутов, В.А. Митмен, А.С. Ребров // 12-ая Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции. Севастополь, 2002. Вебер, 2002. – С. 93

7. Барсов В.И. Оценка СВЧ пробоя в атмосфере (воздухе) при распространении в ней СВЧ импульса / В.И. Барсов, Н.С. Антоненко // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 9 (90). – С. 8 – 11.

8. Барсов В.И. Разработка метода защиты приемных трактов бортовых радиотехнических систем от воздействия мощных импульсных электромагнитных излучений / В.И. Барсов, Н.С. Антоненко // Системы управления, навигации та зв'язку: сб. науч. пр. – К.: ДП «Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління», 2011. – Вып. 2(18). – С. 44 – 47.

9. Пристрій пасивного захисту об'єктів від потужного ЕМІ: Патент на корисну модель. Україна: МПК H01Q17/00 / Сотніков О.М., Сидоренко Р.Г. №81423; Заявл. 07.02.2013; Опубл. 25.06.2013. – Бюл. №12. – 4 с.

10. Захарьев Л.Н. Рассеяние волн «черными» телами / Л.Н. Захарьев, А.А. Леманский. – М.: Мир, 1972. – 318 с.

11. Гольдштейн Л.Д. Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, Н.В. Зернов. Изд. 2-ое, перераб. и дополненное. – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.

12. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и радиоустройств: Учеб. пособие для вузов / Л.С. Гуткин. – М.: Сов. радио, 1986. – 288 с.

Надійшла до редколегії 7.02.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. О.М. Сотніков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ЗАЩИТА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ОТ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Р.Г. Сидоренко, В.А. Лупандин, А.В. Челпанов

Рассмотрены существующие методы защиты радиоэлектронных средств от электромагнитных излучений. Предложено использование радиопоглощающего покрытия на основе композитного материала с радиоизотопными включениями для пассивной защиты радиоэлектронных средств и их соединений с внешними источниками от мощного электромагнитного излучения за счет создания слоев твердотельной и газоразрядной плазмы.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, пассивная защита, радиоэлектронные средства.

## DEFENCE OF RADIO ELECTRONIC FACILITIES FROM POWERFUL ELECTROMAGNETIC RADIATIONS

R.G. Sydorenko, V.A. Lupandin, A.V. Chelpanov

The existent methods of defence of radio electronic systems from electromagnetic radiations are considered. It is suggested for defence of radio electronic systems to use composite material with radio isotopic including, that will allow protecting objects and their connections with external sources from a powerful electromagnetic radiation at the expense of layer creation of hard and gas-unloading plasma.

**Keywords:** electromagnetic radiation, passive defence, radio electronic facilities.