

експериментально виявленого ефекту виникнення негативного диференціального опору на ВАХ діодних структур при впливі на них високого рівня НВЧ потужності можливе при врахуванні розігріву носіїв заряду і детекторного ефекту. Отримані результати доводять доцільність використання в нелінійних радіолокаторах високих рівнів потужності зонduючого сигналу, оскільки зі збільшенням потужності НВЧ сигналу мінімізується значення величини амплітуди змінної напруги на діоді, здатної спричинити випромінювання демаскуючого сигналу, що в свою чергу підвищить вірогідність знаходження та ідентифікації напівпровідника засобами нелінійної радіолокації за співвідношенням рівнів прийнятих 2-ї та 3-ї гармонік сигналу відгуку нелінійного елемента.

Розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням перевипромінюваних гармонік залежить від величини рівня НВЧ потужності зонduючого сигналу – чим вище рівень НВЧ потужності зонduючого сигналу, тим більшим є ефективний радіус розсіювання досліджуваного об'єктом демаскуючого сигналу за кутом місця в зоні Фраунгофера, що в свою чергу підвищує ймовірності знаходження та вірної ідентифікації напівпровідникових елементів засобами нелінійної радіолокації.

*Література: 1. Хорошко В. А., Чекатков А. А. Методы и средства защиты информации. К.: "Юниор", 2003. – 504 с. 2. Каторин Ю. Ф. Куренков Е. В., Лысов А. В., Остапенко А. Н. Энциклопедия промышленного шпионажа: ООО «Издательство Полигон».- С.-Петербург, 2000. – 512 с. 3. Каргашин В. Л., Ткач В. Н., Ткачев Д. В. Нелинейная ближняя радиолокация. Новые алгоритмы идентификации электронных устройств // Специальная Техника, ОАО «Электрозавод», Москва, №6, 2006г. с: 42–48. 4. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с. 5. Радченко С. Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей: Монография. – К.: ПП «Санпель», 2005. – 504 с. 6. Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф. Ідентифікація напівпровідників засобами нелінійної локації за двома гармоніками // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2009. – Вип. 38. – 169 с. 7. Соболев С. Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 443 с. 8. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с. 9. Марков Г. Т., Сазанов Д. М. Антенны. Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., «Энергия», 1975. –528 с. 10. Вычислительные методы в электродинамике. – Под ред. Митры, М.: Мир, 1977. – 485 с.*

УДК 62-768:537.531

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ СІТКИ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ

**Юрій Яремчук, Максим Притула, Євгеній Ніколаєв, Вікторія Козел**

*Вінницький національний технічний університет*

*Анотація: Проведено аналіз ефективності застосування металеві сітки для екранування.*

*Summary: The effectiveness of metal mesh for shielding is analyzed.*

*Ключові слова: Суцільний екран, екран із сітки, ефективність екранування.*

### І Вступ

Зростання кількості електронних пристроїв для обробки інформації призводить до збільшення рівня випромінювання в оточуюче середовище. Разом з тим, активне використання електромагнітних ресурсів, що пов'язане з розвитком радіозв'язку і різноманітних систем передавання та обробки інформації, телебачення, мобільного зв'язку, радіолокації і радіонавігації, призводить до появи додаткового електромагнітного фону [1].

З появою додаткового електромагнітного фону зростає ймовірність витоку інформації з пристроїв обробки за рахунок електромагнітних випромінювань і наведень [2].

В зв'язку з цим все гостріше постає проблема захисту від витоку інформації за рахунок електромагнітних випромінювань або від зовнішнього впливу електромагнітних випромінювань на цілісність інформації в пристроях її обробки [3].

Для усунення наведень від технічних засобів передавання інформації в приміщеннях, лінії яких виходять за межі контрольованої зони, необхідно не тільки придушити їх у лініях, а й обмежити сферу дії електромагнітного поля, яке створюється в безпосередній близькості від джерела системою його внутрішніх

провідників. В сучасних умовах, для вирішення цієї проблеми та проблеми електромагнітної безпеки широко застосовується екранування [2].

При розробці конструкцій екранів або поверхонь, які поглинають електромагнітні випромінювання (ЕМВ), використовуються різноманітні матеріали, які мають здатність відбивати або поглинати ЕМВ в певному діапазоні частот. Слід зазначити, що в природі не існує ні ідеально відбиваючих, ні ідеально поглинаючих електромагнітну енергію матеріалів, тому придушення ЕМВ найчастіше забезпечується за рахунок обох процесів.

До радіовідбиваючих матеріалів відносяться різні метали. Найчастіше використовуються залізо, сталь, мідь, латунь, алюміній. Металеві екрани відомі вже давно і широко використовуються. Вони відрізняються високою ефективністю на радіочастотах, яка збільшується при підвищенні частоти падаючого ЕМВ, і технологічно виконуються у вигляді суцільних і перфорованих листів, сіток, решіток, трубок і можуть бути нанесені у вигляді тонкоплівкових покриттів [2].

Вибір кількості рівнів і матеріалів екранування здійснюється з урахуванням [2]:

- характеристик випромінювання (тип, частота і потужність);
- вимог до рівня випромінювання за межами контрольованої зони і розмірів зони;
- наявності чи відсутності інших методів захисту від побічних електромагнітних випромінювань та наведень;
- мінімізації витрат на екранування.

У захищених приміщеннях екрануються двері та вікна. Вікна екрануються сіткою, металізованими шторами, металізацією стікол і обклеюванням їх струмопровідними плівками. Двері виконуються із сталі або покриваються струмопровідними матеріалами (сталевий лист, металева сітка). При цьому, на практиці для екранування приміщень використовуються: листовая сталь товщиною до 2 мм, сталева (мідна, латунна) сітка з коміркою до 2,5 мм.

Проте металеві екрани мають один суттєвий недолік, який пов'язаний з їх високою електропровідністю: високий коефіцієнт відбиття, обумовлений великими відмінностями хвильового опору вільного простору і екрану. Крім того, ефективність таких екранів дуже сильно залежить від якості та надійності монтажу електричних контактів, при порушенні яких з'являються області перевипромінювання ЕМВ [1].

Екранувальні властивості листового металу кращі, ніж у сітки. Проте, сітка зручніша в конструктивному відношенні, особливо при екрануванні оглядових і вентиляційних отворів, вікон, дверей і т. п. Захисні властивості сітки залежать від величини комірки та товщини провідника: чим менші розміри комірки і товстіший провідник, тим кращі її захисні властивості [1, 2].

Однак, актуальним стає питання дослідження екранів з металевої сітки, в першу чергу, з точки зору ефективності екранування.

## II Математичне дослідження ефективності екранів з металевої сітки

При дослідженні ефективності екранів з металевої сітки звернемось спочатку до випадку екранування півпростору від плоскої хвилі нескінченим плоским екраном з сітки. На рисунку 1 зображено магнітне поле струмів, які протікають по сітці та по суцільному екрану. При цьому використано такі позначення:  $a$  - відстань між осями сусідніх паралельних провідників (крок сітки),  $D$  - діаметр дроту ( $D \ll \lambda / 4$ ).

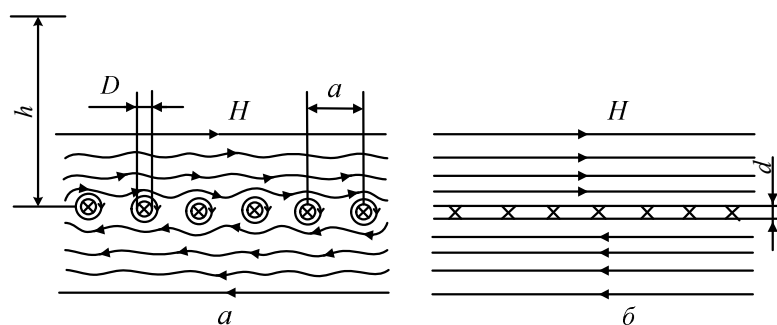


Рисунок 1 – Магнітне поле струмів, які протікають по сітці (а) та по суцільному екрану (б)

Вважаємо, що хвиля падає на екран під прямим кутом, причому вектор напруженості електричного поля  $E_1^+$ , який падає на екран, паралельний одній та перпендикулярний іншій групі провідників, що утворюють

сітку. Провідники, перпендикулярні  $E_1^+$ , незначно впливають на ефект екранування [2, 4], отже, їхнім впливом можна знехтувати.

В провідниках, паралельних  $E_1^+$  виникають струми. Магнітні поля цих струмів (рис. 1,а) поблизу провідників суттєво відрізняються від однорідного магнітного поля, яке створюється струмом, рівномірно розподіленим за перерізом суцільного екрану (рис. 1,б).

Однак, на відстанях  $h$  від сітки, які значно перевищують її крок, різниця прямує до нуля. Це дає підстави вважати, що в області частот, де поверхневим ефектом можна знехтувати, екран з сітки повинен бути еквівалентним (при  $h \gg a$ ) суцільному екрану, по якому на одиницю довжини в напрямку магнітного потоку припадає такий же струм, що й протікає по всім провідникам сітки на одиницю довжини.

Для суцільного екрану цей струм  $I_1$  дорівнює

$$I_1 = E_2^+ \sigma d,$$

де  $E_2^+$  – вектор поля, яке проходить через екран.

Для сітки при тому ж  $E_2^+$ , цей струм дорівнює

$$I_2 = nE_2^+ / R_-,$$

де  $R_-$  – опір 1 м одного провідника постійного струму,

$n$  – кількість провідників на одиницю довжини.

Так як  $n = 1/a$ , то ефективність екрану з сітки можна отримати за формулою ефективності екранування однорідного плоского екрану

$$E_{пл} = 60\pi\sigma d.$$

При  $d/\delta < 0,1$  із заміною в ній  $\sigma d$  на  $1/(R_-a)$ , тобто

$$E_{пл} = 60\pi \frac{1}{R_- \alpha}. \quad (1)$$

З підвищенням частоти сітка починає проявляти властивості, які суттєво відрізняються від властивостей суцільного екрану [1]. Ефективність суцільного екрану через ослаблення поля при проникненні крізь товщину екрану швидко росте, у сітки ж це ослаблення відсутнє. Поверхневий ефект призводить лише до збільшення активного опору 1 м кожного провідника ( $R$ ) порівняно з  $R_-$ . Це зменшує ефективність екранування.

Необхідно враховувати також зростаючу роль індуктивного опору  $x = \omega L$  провідників, через які у формулу (1) замість  $R_-$  потрібно ввести  $z = |R + j\omega L|$ . При  $\omega L > 3R$  можна вважати, що [4]

$$E_{пл} = 60\pi \frac{1}{\omega L \alpha}. \quad (2)$$

Більш детальний аналіз приводить до такої формули для  $E_{пл}$  екрану з сітки [4]

$$E_{пл} = \frac{\lambda}{2a |\ln(2a/D) - 1,2 + (\lambda R_- / 120\pi)[\beta(u) + j\alpha(u)]|}, \quad (3)$$

де

$$\alpha(u) = \frac{R}{R_-} = \frac{u \operatorname{ber}(u)\operatorname{bei}'(u) + \operatorname{bei}(u)\operatorname{ber}'(u)}{2 [\operatorname{ber}'(u)]^2 + [\operatorname{bei}'(u)]^2};$$

$$\beta(u) = \frac{x_B}{R_-} = \frac{u \operatorname{ber}(u)\operatorname{ber}'(u) + \operatorname{bei}(u)\operatorname{bei}'(u)}{2 [\operatorname{ber}'(u)]^2 + [\operatorname{bei}'(u)]^2};$$

$$u = \frac{D}{\sqrt{2}\delta};$$

$x_B$  – реактивний опір 1м провідника, зумовлений його внутрішньою індуктивністю (магнітним полем всередині металу);

$ber(u)$  та  $bei(u)$  функції Кельвіна першого роду, які можуть бути представлені у вигляді ряду [5]:

$$ber(u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k u^{4k}}{2^{4k} [(2k)!]^2};$$

$$bei(u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k u^{(4k+2)}}{2^{(4k+2)} [(2k+1)!]^2};$$

$ber'(u)$  та  $bei'(u)$  похідні функцій Кельвіна першого роду.

При  $u < 6$ , значення  $\alpha(u)$  та  $\beta(u)$  можуть бути визначені з графіків, які представлено на рисунку 2.

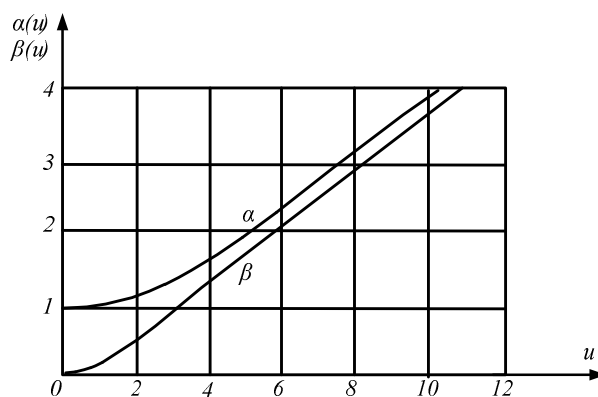


Рисунок 2 – Графіки функцій  $\alpha(u)$  та  $\beta(u)$

При  $u > 50$  можна з більшою точністю вважати, що

$$\alpha(u) = \beta(u) = \frac{u}{2\sqrt{2}}. \quad (4)$$

При  $50 > u > 6$  можна вважати, що

$$\alpha(u) = \frac{\sqrt{2}u + 1}{4}; \quad \beta(u) = \frac{u}{2\sqrt{2}}. \quad (5)$$

При  $f \rightarrow 0$  маємо  $\beta(u) \rightarrow 0$ ,  $\alpha(u) \rightarrow 1$ ,  $\lambda \rightarrow \infty$  та формула (3) перетворюється в (1). Із зростанням частоти результат множення  $\lambda[\beta(u) + j\alpha(u)]$  зменшується і  $E_{III}$  стає майже пропорційним довжині хвилі  $\lambda$ , що відповідає формулі (2).

### III Аналіз експериментальних досліджень екранів з металевої сітки

Проведемо аналіз параметрів та характеристик металевих сіток, які використовуються для захисту інформації.

Експериментальні залежності  $E_{III}$  від частоти для трьох мідних сіток (суцільні лінії) та трьох сталених з  $\mu = 50$  (штрихові лінії) представлено на рисунку 3.

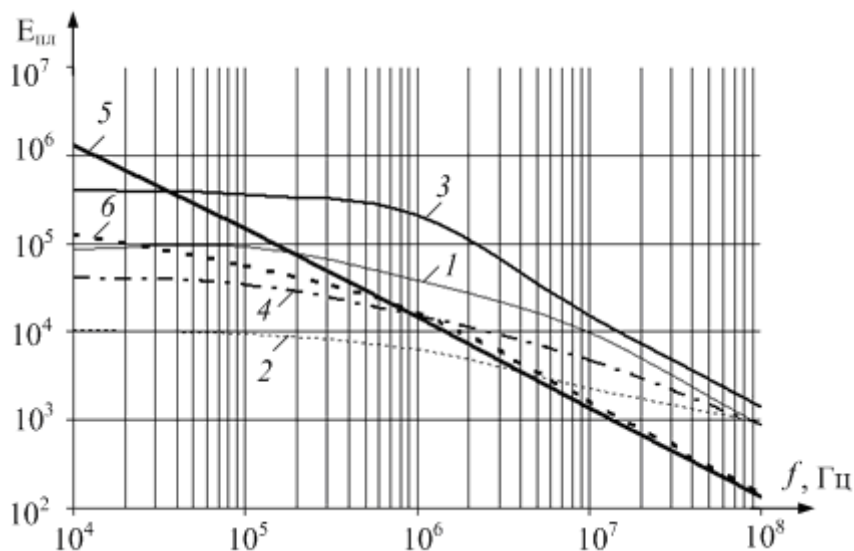


Рисунок 3 – Залежність  $E_{пл}$  від частоти для металевих сіток:

- 1 - мідна з  $D = 0,1\text{мм}$ ,  $a = 1\text{ мм}$ ;
- 2 - сталеві з  $D = 0,1\text{мм}$ ,  $a = 1\text{ мм}$ ;
- 3 - мідна з  $D = 0,2\text{мм}$ ,  $a = 1\text{ мм}$ ;
- 4 - сталеві з  $D = 0,2\text{мм}$ ,  $a = 1\text{ мм}$ ;
- 5 - мідна з  $D = 2\text{мм}$ ,  $a = 10\text{ мм}$ ;
- 6 - сталеві з  $D = 2\text{мм}$ ,  $a = 10\text{ мм}$ .

Провівши аналіз графіків рис. 3 можна зазначити:

1. При  $a/D = const$ , сітки з більшим  $a$  з даних матеріалів на низьких частотах більш ефективні, а на високих частотах менш ефективні, ніж сітки з меншим  $a$ . Ця закономірність пояснюється тим, що активний опір кожного провідника на низьких частотах обернено пропорційний  $D^2$ , отже  $R_a = const/D$ , на високих частотах обчислення проводяться за формулою (2), в якій  $L$  мало залежить від  $D$ .

2. При однакових  $a$  та  $D$  мідні сітки на низьких частотах мають кращу ефективність екранування ніж сталеві в стільки разів, в скільки питомі провідності міді більша, ніж сталі. З підвищенням частоти різниця між цими сітками зменшується, бо основну роль починає грати зовнішня (за рахунок магнітного потоку, що проходить ззовні металу) індуктивність провідників.

3. При  $a = const$  в одному і тому ж матеріалі, сітки з товстого провідника ефективніші сіток з тонких провідників: в області низьких частот  $E_{пл}$  пропорційна  $D^2$ , а в області високих частот – приблизно пропорційна  $\left(\ln \frac{2a}{D} - 1,2\right)^{-1}$ .

Необхідно зазначити, що існують й інші екрануючі металеві сітки [6], які випускаються промисловістю. Наприклад: С685, С450, П300, С120, П24, П28, П68, П72 та інші. Конструкцію та їх параметри наведено в [6]. Ефективність екранування в діапазоні частот 30МГц - 1000МГц становить не менше 40-80 дБ за електромагнітною складовою поля.

Таким чином, при використанні металевих сіток як екрану необхідно звернути увагу на наявність електричного контакту струмопровідних шарів. Також, при екрануванні полів недопустимим є наявність зазорів та щілин в екрані. Розмір комірки сітки повинен бути не більший за 0,1 довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

За результатами практичних досліджень, які викладено в [7], слід зазначити, що найчастіше для екранування використовують мідні і латунні сітки з комірками від 0,4 до 4 мм. Завдяки прийнятним показникам щодо відносної магнітної провідності, найбільш бажаним матеріалом є мідь. Але висока вартість сировини порівняно з латунною сіткою робить мідну сітку менш доступною. Але не слід забувати, що

ефективність екранів на основі металевих сіток зменшується зі зростанням частоти, що обмежує їх використання в галузі захисту інформації.

Розвиток та вдосконалення екранів на основі металевих сіток сприяв пошуку нових ефективніших екранів на основі тканин. Зараз розроблено різні варіанти тканинних екранів. Наприклад, радіонепрозорі поліефірні тканини типу ІП-НЗ «Метакрон» з нікелевим покриттям, радіоекрануючі тканини «РІКМА», УТТ, ТТН та інші [5, 8].

#### IV Висновки

Проведений аналіз показав, що металеві сітки можуть використовуватись для екранування в захисті інформації від витіку каналами побічних електромагнітних випромінювань та наведень. Але при цьому на кожному об'єкті де вони використовуються, слід враховувати такі основні параметри інформативного випромінювання як частота, потужність, смуга випромінювання. Зокрема, якщо необхідно екранувати низькі частоти, то доцільно використовувати сітки з більшим розміром комірки і з матеріалу, в якого питома провідність більша. При цьому, на високих частотах, застосування металевих сіток для екранування є недоцільним, оскільки ефективність екранування на високих частотах зменшується.

Подальше вивчення та вдосконалення екранів на основі металевих сіток сприяє пошуку та синтезу нових більш ефективних та дешевших екрануючих матеріалів.

*Література: 1. Козловський В. В., Софіїнко І. І. Экранирующие свойства современных материалов // Научно-технический журнал "Вісник ДУІКТ". – 2009. – №7(3). – С. 233-245. 2. Методы и средства защиты информации. В 2-х томах / Ленков С. В., Перегудов Д. А., Дорошко В. А., Под ред. В. А. Хорошко. – К.: Арий 2008. – 464 с., 344 с. 3. Гутник В. І., Яремчук Ю. Є., Притула М. О., Головатюк О. В. Дослідження вітчизняної радіонепрозорої тканини НЗ // "Сучасна спеціальна техніка". – 2010. – №1(20). – С. 74–80. 4. Шапиро Д. Н. Электромагнитное экранирование: научное издание. – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2010. – 120 с. 5. Абрамовиц А., Стиган І. Справочник по специальным функциям. - М.: Наука, 1979. – 832с. 6. <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=1649&tbl=03.03.01.02>. 7. <http://www.td-mc.ru/screen.htm>. 8. Пат. RU2229544 С1, МКИ D03D1/00. "Ткань для специальной одежды" // Левакова Н. М.; Пазина І. П.; Горынина Е. М.; Фатхутдинов Р. Х.; Тарасов Л. А.; Комплев Р. А. - №2003107998/12. Заявл. 26.03.2003; Опубл. 27.05.2004.*