

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ФОРМИ СИГНАЛУ У КАНАЛІ ПОБІЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ МОНІТОРУ

Вступ

Термін ПЕМВ (побічні електромагнітні випромінювання) з'явився лише у другій половині ХХ ст., коли постала проблема розробки методів захисту інформації, яка циркулювала в електронній апаратурі. За кордоном даний термін вживається як "compromising emanation" – компрометуюче випромінювання. Вім ван Ек в 1985 р. у статті "Електромагнітне випромінювання відеодисплейних модулів: Ризик перехоплення?" та на виставці Securecom-85 в Каннах вперше продемонстрував небезпеку ПЕМВ. Таким чином, було показано, що об'єктивно існує канал витоку інформації за рахунок ПЕМВ.

В наш час до вирішення проблеми захисту ПЕМВ підходять як зі сторони практичних, так і зі сторони теоретичних досліджень. Дослідження базуються на оцінці залежностей між характеристиками моніторів та результуючими спектрами створених ним випромінювань. Перевищування рівня ПЕМВ певних норм дає підставу вважати про можливий витік інформації. Водночас питання вигляду результатів розвідки ПЕМВ, які власне можуть відобразитися на екрані монітору розвідувального пристрою, їх адекватності вихідному зображенню не розглядаються. А це, на погляд авторів, може бути важливим фактором якості пов'язаних процесів розвідки-захисту ПЕМВ.

Мета статті – виявлення факторів, які впливають на форму сигналу у дальній зоні каналу ПЕМВ при його розвідці.

Опис розповсюдження ПЕМВ у дальню зону

Теорія електромагнітного поля розглядає декілька моделей випромінювачів електромагнітних полів, але в реальних системах, які описують канал ПЕМВ здебільшого зустрічаються лише деякі з них – рамка та диполь. Причому диполь, як джерело ПЕМВ, характерний для варіанту нештатної роботи апаратури (обрив провідника) для подальшого аналізу неактуальний.

Рамка – модель реальної електричної схеми кола перетворення (підсилення) відео-сигналу, яка має певні фізичні розміри та орієнтацію у просторі. Навколо рамки за законами електродинаміки створюється електромагнітне поле [1].

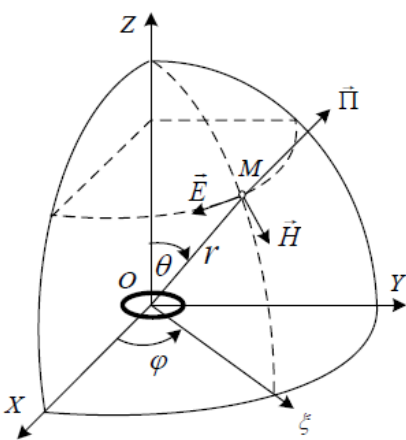


Рис. 1. Схема орієнтації складових поля випромінювання рамки зі струмом

Рішення рівнянь Максвелла для елементарного рамкового випромінювача відомі для гармонійного струму частоти ω й амплітуди I . При цьому повинна виконуватись умова квазістаціонарності – фаза гармонійного коливання в рамці скрізь однакова. Це еквівалентно співвідношенню: загальна довжина провідників рамки – не більше, принаймні, половини довжини хвилі λ коливання в рамці. На практиці для найбільшої досліджуваної частоти $f=1$ ГГц, загальна довжина провідників рамки не повинна перевищувати 15 см. Якщо рамка перевищує зазначені розміри, то розрахунки випромінювань необхідно виконувати по напівемпіричним формулам теорії антен [2]. Цей варіант лежить за межами даного дослідження.

Рішення рівнянь Максвелла [1] у комплексній формі для векторної складової поля показує зв'язок між амплітудою, частотою та фазою гармонійного струму в рамці з аналогічними параметрами складових електромагнітного поля в обраній точці простору. Ілюстрація наведена в полярній системі координат (рис. 1)

З метою наступного аналізу, спрощення й наочності одержання результатів варто систему рівнянь [1] записати у виді

$$\begin{cases} \dot{E}_\varphi(\omega) = \omega^2 \frac{IsW}{4\pi c^2} \left[1 - i \frac{1}{kr} \right] \sin \theta, \\ \dot{H}_r(\omega) = i\omega \frac{Is}{2\pi^2 c} \left[1 - i \frac{1}{kr} \right] \cos \theta, \\ \dot{H}_\theta(\omega) = -\omega^2 \frac{Is}{4\pi c^2} \left[1 + i \frac{1}{kr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] \sin \theta, \end{cases} \quad (1)$$

де ω – частота; W – хвильовий опір простору ($W=120\pi$); r – відстань до точки спостереження; θ – меридіальний кут на точку спостереження; s – площа рамки; c – швидкість світла; \dot{I} – комплексна амплітуда струму в рамці.

При виведенні (1) використані співвідношення для хвильового числа $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, та хвильового опору простору $W = \mu c$, де μ – магнітна стала простору. Крім того, на рис. 1 вектор \bar{H}_r співпадає з напрямом вектору \bar{I} . ($e^{j(\omega t - kr)}$ – хвильовий множник опущений). Оскільки φ – азимутальний кут ніде не фігурує, це означає, що поле симетричне щодо осі OZ.

Подальший крок – визначити комплексну передатну функцію по складовим поля E и H для аргументу $-I(\omega)$ для дальньої зони ПЕМВ. Критерій дальньої зони: $kr \gg 1$.

У системі рівнянь (1) видно, що значення модуля другого рівняння набагато менше третього (у знаменниках значення r із різними ступенями). Тоді складовою поля H_r можна нехтувати. Таким чином, можна, з точністю до знака, записати:

$$\begin{aligned} K_E(\omega) &= \frac{\dot{E}}{\dot{I}} \approx \omega^2 \frac{sW}{4\pi c^2} \sin \theta, \\ K_H(\omega) &= \frac{\dot{H}}{\dot{I}} \approx \omega^2 \frac{s}{4\pi c^2} \sin \theta. \end{aligned} \quad (2)$$

Вирази дозволяють визначити спектральні характеристики поля E або H ПЕМВ дальньої зони по спектральній характеристиці вихідного сигналу $S_i(\omega)$ у електричному колі пристрою, що ці ПЕМВ створює, за очевидними формулами:

$$S_E(\omega) = K_E(\omega) * S_i(\omega) = \omega^2 \frac{sW}{4\pi c^2} \sin \theta * S_i(\omega), \quad (3)$$

$$S_H(\omega) = K_H(\omega) * S_i(\omega) = \omega^2 \frac{s}{4\pi c^2} \sin \theta * S_i(\omega). \quad (4)$$

На основі основних властивостей перетворювань Фур'є наявність множників ω^2 у (3) та (4) дає підставу вважати, що форма вихідного сигналу у часі $a(t)$, яка породжує його спектральну функцію $S_i(\omega)$, трансформується у часову форму напруженості поля $e(t)$ яка відповідає другій похідній $a''(t)$.

Таким чином, миттєве значення електрорушійної сили (е.р.с.) $\varepsilon_d(t)$, що наводиться у дипольній антені засобу розвідки буде становити $\varepsilon_d(t) = l * e(t)$ (при малій довжині антени $l \ll \lambda$, де λ – найкоротша довжина хвилі спектру ПЕМВ). Форма $\varepsilon_d(t)$ у часі буде відповідати другій похідній вихідного сигналу $a(t)$.

Для ведення розвідки ПЕМВ може також використовуватися і магнітна (рамкова) антена засобу розвідки. Тоді е.р.с. $\varepsilon_p(t)$, що наводиться у такій антені (антена малого розміру: $\sqrt{s_p} \ll \lambda$) може бути виражена як

$$\varepsilon_p(t) = \mu s_p \frac{dH(t)}{dt}. \quad (5)$$

У даному виразі s_p площа рамкової антени засобу розвідки.

Похідна $\frac{dH(t)}{dt}$, виходячи із властивостей перетворень Фур'є, у спектральному виразі приводить до появи додаткового множника ω у виразі спектру прийнятого рамковою антеною сигналу. Таким чином, вираз для спектру сигналу рамкової антени буде включати у собі множник ω^3 по відношенню до вихідного спектру сигналу у колі пристрою. По аналогії з обґрунтуванням ствердження щодо форми $\varepsilon_p(t)$ можна зробити висновок, що вона буде відповідати вже формі третьої похідної $a'''(t)$ вихідного сигналу.

Одержані ствердження щодо закономірностей трансформації форми розвідуваних сигналів ПЕМВ у дальній зоні дає підставу перейти до наступного кроку подальшого дослідження.

Визначення форми сигналу у каналі ПЕМВ

Суттю подальших досліджень дальньої зони каналу ПЕМВ буде одержання аналітичної форми представлення розвідуваного сигналу на виході приймальної антени у нерозривному виді. Вимога з нерозривності аналітичного виразу для форми прийнятого сигналу обумовлюється тим, що у реальному світі технічний канал ПЕМВ є аналоговим. В ньому формуються сигнали, які у суворому змісті є аналоговими: не мають ідеальних розривів, сачків, дельта-функцій тощо. Основні причини тому – обмеженість енергій сигналів та їх потужностей, наявність реактивності у тракці формування сигналів, особливості фізичних явищ при роботі напівпровідникових та електровакуумних приладів.

Проведений надалі аналіз представлений для прямокутних симетричних сигналів, що створюють зображення тексту на екрані монітору. Основні параметри таких сигналів (рис. 2):

A – амплітуда; δ – довжина переходу сигналу між лінійними частинами (між стаціонарним значенням і лінійною зміною і навпаки); Δ – час, що визначає лінійне зростання (зменшення) сигналу від 0 до A ; τ – довжина імпульсу по рівню половини амплітуди (як правило, ця величина і несе у собі інформацію з обмеженим доступом для текстів).

Імпульс із зазначеними параметрами зображений на рис. 2, *a*.

Проводячи послідовне графічне диференціювання функції (рис.2, *a*), потрібно обирати такі форми сигналів, які не будуть давати розрив послідуєчих похідних, щоб не було розривів, стрибків наступних похідних від $a(t)$: $a'(t)$, $a''(t)$, У досліджуваному випадку, визначеному як вимога нерозривності третьої похідної, можна обмежитись формою, наведеною на рис. 2, *з*.

Таким чином, реакція електричної антени пристрою розвідки на ПЕМВ буде мати вигляд, наведений на рис. 2, *в*, а магнітної – рис.2, *г*.

З наведеного вище витікає:

- 1) у дальній зоні реакція розвідувального пристрою на вихідний інформаційний імпульс визначається чотирма ділянками переходу сигналу між лінійними частинами;
- 2) довжина кожного з імпульсів реакції становить значення δ ;
- 3) відстань між окремими імпульсами для фронту і спаду визначається значеннями Δ лінійного зростання (зменшення) сигналу від 0 до A ;

4) відстань між парами імпульсів фронту (спаду) залежить від інформаційного параметру вихідного імпульсу τ (власне це і є складова інформації з обмеженим доступом для текстів).

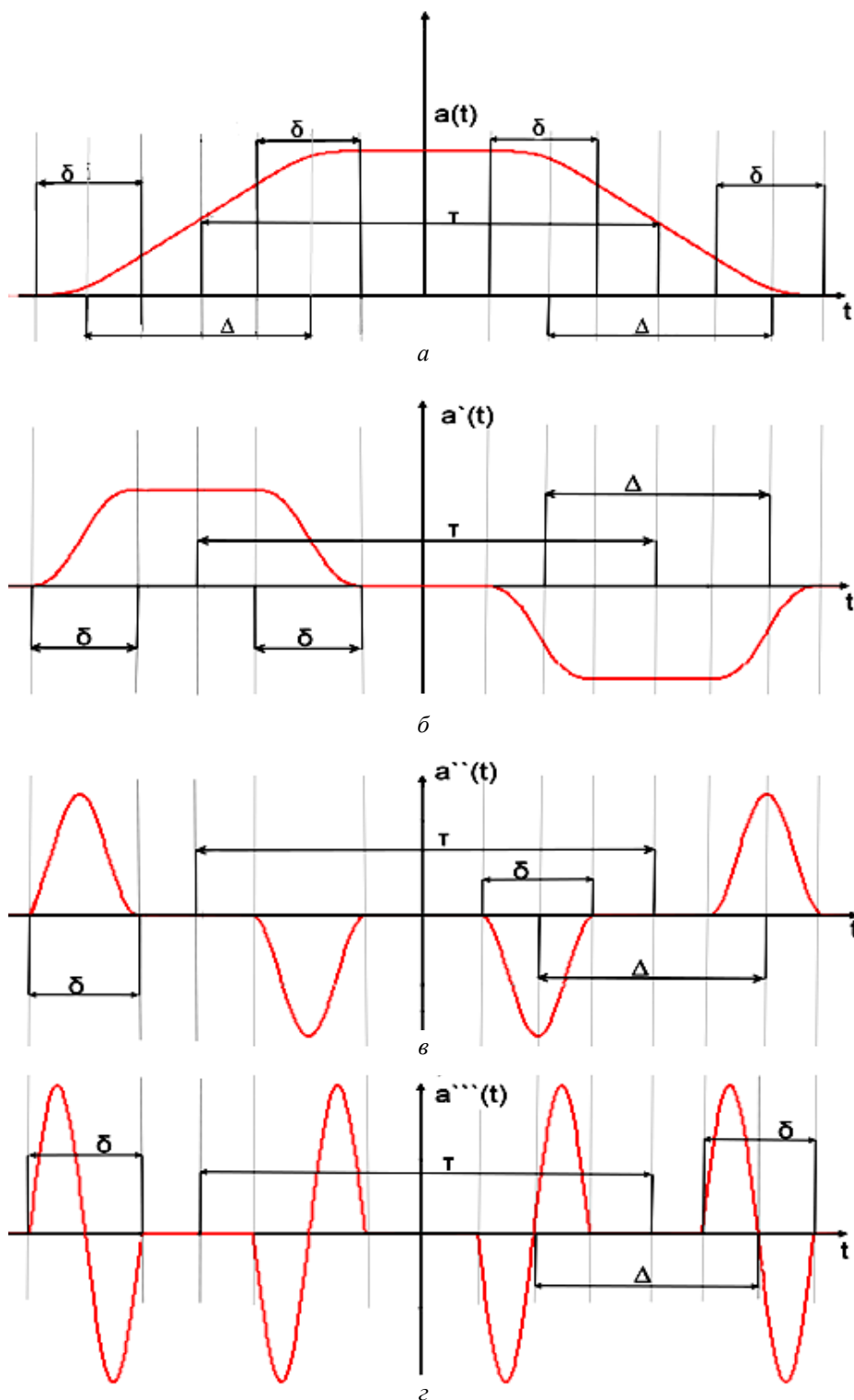


Рис.2. Симетричний трапецеїдальний імпульс та його похідні

Визначення спектру сигналу у дальній зоні ПЕМВ

Спектральна функція сигналу ПЕМВ у дальній зоні нескладно може бути визначена із властивостей Фур'є перетворювань. Якщо взяти третю похідну сигналу, зображену на рис.2, з, та перенести до його центру першого з імпульсів початок координат, то буде одержана функція з виглядом рис. 3.

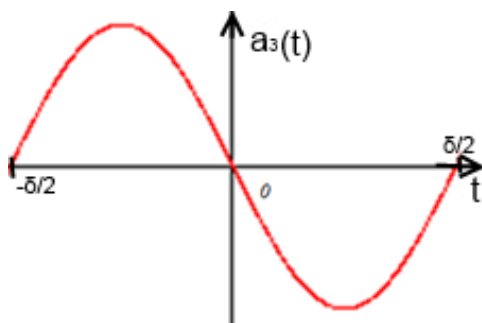


Рис. 3. Графік першого сигналу третьої похідної трапецеїдального імпульсу із гладкими фронтами

Цей сигнал представлений в аналітичному вигляді на ділянці $-\delta/2 \dots +\delta/2$:

$$a'''(t) = a_3(t) = -A_3 \sin\left(\pi \frac{2t}{\delta}\right). \quad (6)$$

Після нескладних перетворювань його спектр буде визначений як

$$S_3(\omega) = 2 \int_0^{\delta/2} a_3(t) j \sin(\omega t) dt = j 2 A_3 \sin\left(\omega \frac{\delta}{2}\right) \frac{2\pi/\delta}{(2\pi/\delta)^2 - \omega^2}. \quad (7)$$

При цьому використана властивість непарності вихідної функції (6).

За теоремами про спектр суми окремих імпульсів можна визначити їх сумарний спектр. При цьому слід також використати властивість зміни спектру сигналу при його зсуві у часі. Величина зсуву кожного з чотирьох імпульсів, з врахуванням відповідних знаків, визначається значеннями τ та Δ (див. рис. 2).

Вираз $e^{-j(-\tau/2-\Delta/2)\omega} - e^{-j(-\tau/2+\Delta/2)\omega} - e^{-j(\tau/2-\Delta/2)\omega} + e^{-j(\tau/2+\Delta/2)\omega}$, породжений врахуванням зсуву чотирьох імпульсів легко зводиться до:

$$-4 \sin(\omega \Delta / 2) \sin(\omega \tau / 2). \quad (8)$$

Таким чином, можна записати модуль спектральної функції сигналу рис. 2, з як добуток виразів (7) та (8):

$$S(\omega) = \left| 8 A_3 \sin\left(\omega \frac{\delta}{2}\right) \frac{2\pi/\delta}{(2\pi/\delta)^2 - \omega^2} \sin(\omega \Delta / 2) \sin(\omega \tau / 2) \right| \quad (9)$$

Графік такої функції, побудований в програмному середовищі Mathcad 15 показаний на рис. 4 (для визначеності узяті характеристики імпульсу $\tau=23, \delta=3, \Delta=11, A_3=1$).

Спектральна функція сигналу електричної антени, точною до коефіцієнта A_2 , буде відрізнятися від (9) наявністю множника $j\omega$ у знаменнику, що цілком відповідає властивостям Фур'є перетворювань.

При практичних вимірах ПЕМВ за положенням "нулів" на графіку можна визначити параметри δ та Δ при відомому значенні τ .

Так, перший нуль на рис. 4 відповідає частоті $\omega_\tau = 2\pi/\tau \approx 0,273$. Нескладно визначити значення частоти $\omega_\Delta = 2\pi/\Delta \approx 0,571$. Невизначеність типу 0/0 при частоті $\omega_\tau = 2\pi/\delta \approx 2,09$ розкривається як ненульова, і тому наступний нуль, визначений частотою $2\omega_\tau \approx 4,18$, явно присутній на рис. 4.

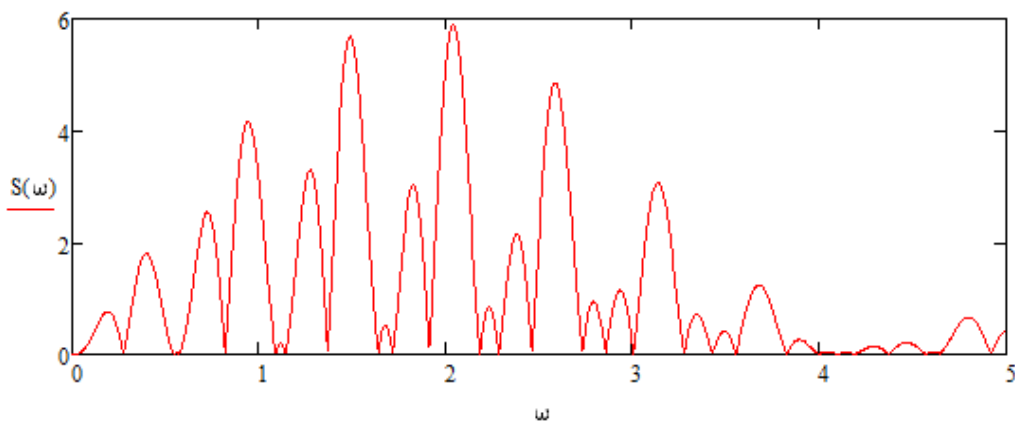


Рис. 4. Графік модуля спектру третьої похідної трапецеїдального імпульсу з гладкими фронтами

Слід, також зазначити, що у випадку дослідження ПЕМВ періодичних тестових сигналів, окремі спектральні складові будуть обмежені огинаючою, наведеною на рис. 4.

Висновки

1. Проведений аналіз показав – у дальній зоні, в залежності від типу розвідувальної антени, форма розвідуваного сигналу ПЕМВ визначається формою другої або третьої похідної від форми вихідного струму у колі електричної схеми перетворення (підсилення) відеосигналу.

2. Величини параметрів δ та Δ схеми перетворення (підсилення) відеосигналу можна визначити у ході проведення практичних вимірювань за положенням "нулів" оцінюваного спектру ПЕМВ.

Список літератури: 1. Гольдштейн, Л.Д., Зернов, Н.В. Электромагнитные поля и волны. – М. : Сов. радио, 1971. – 664с. 2. Харкевич, А.А. Спектры и анализ. 4-е изд. – М. : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1962. – 236с. 3. Заболотный, В.И., Емельянова, Ю.В., Муромцева, Н.А. Модель технического канала утечки информации за счёт побочных электромагнитных излучений монитора // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – № 6. – С. 33-37. 4. Заболотный, В.И., Герасименко, Е.В. Трансформация формы сигнала в канале побочных электромагнитных излучений // 16-я междунар. науч.-практ. конф. «Безопасность информации в информационно-телекоммуникационных системах», 21 – 24 мая 2013 г. Тезисы докладов. – 2013. – 155 с.

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Надійшла до редколегії 12.01.2014