

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом почався процес інтенсивного впровадження нових телекомунікаційних технологій. Широке поширення одержали нові технології стаціонарного і рухомого радіозв'язку, побудовані на основі стільникових структур: системи стільникового рухомого зв'язку; системи транкінгового рухомого радіозв'язку; системи відомчого і технологічного радіозв'язку; системи абонентського радіодоступу, системи Wi-Fi, Wi-Max та ін. На окремих об'єктах, в офісах, на обмеженій території може встановлюватися велика кількість різноманітних радіозасобів, що призводить до утворення множинного характеру електромагнітних взаємодій між ними та різкого зростання загального рівня випромінювань, що призводить до появи взаємних завад.

Як показали дослідження, у 70% випадків взаємні завади обумовлені інтермодуляцією, що є наслідком нелінійних ефектів, які виникають у вхідних каскадах радіоприймального пристрою (РПП). Сприйнятливість до впливу інтермодуляційних завад (ІЗ) – важливий показник електромагнітної сумісності РПП. У службах радіозв'язку з великою кількістю радіоелектронних засобів (РЕЗ) інтермодуляційні завади являються обмежуючим фактором для збільшення завантаження радіочастотного ресурсу і високої якості самого зв'язку.

Існуючі методики оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС) по ІЗ, використовують методи, які засновані здебільшого на парній оцінці взаємодій. Відомі методики групової оцінки припускають виділення й врахування тільки трьох основних завад з множини вхідних впливів, та дозволяють розраховувати рівні ІЗ не вище третього порядку. Втім, при множинних взаємодіях розглядом третього порядку обмежуватись не можна, оскільки значний рівень мають компоненти і більш високих порядків. При концентрації безпроводних систем різних стандартів на невеликих відстанях один від одного у результаті множинних впливів збільшується імовірність утворення ІЗ, обумовлених великою кількістю РЕЗ. Очевидно, що існуючі методики оцінки ЕМС по інтермодуляції не дозволяють враховувати множинний характер впливів, тому для більш точного відображення множинного характеру взаємодій необхідно враховувати ІЗ високих порядків.

Таким чином, актуальність теми дисертаційних досліджень визначається необхідністю розробки методики оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинному впливі на вхідні каскади РПП з типовою нелінійністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота пов'язана з рядом НДР, що проводяться Харківським національним університетом радіоелектроніки, кафедрою телекомунікаційних систем, де виконувались

дисертаційні дослідження. Дані розробки і дослідження представлені у звітах по НДР, що виконувалися за участю автора дисертаційної роботи відповідно плану НДР і ДКР Харківського національного університету радіоелектроніки "Дослідження методів забезпечення електромагнітної сумісності систем абонентського радіодоступу в ліцензованих і неліцензованих ділянках радіоспектру" (д.р. № 0104U004072), "САРД 2004" (д.р. № 0105U002123).

Мета та задачі дослідження. Метою досліджень є розробка методики оцінки впливу інтермодуляційних завад на електромагнітну сумісність радіоелектронних засобів при множинному впливі сигналів, що заважають, на вхідні каскади приймачів, прохідна характеристика яких апроксимується нелінійністю високого порядку.

Задачі досліджень:

1. Вибір і обґрунтування критеріїв оцінки EMC PE3 і моделей електромагнітних взаємодій для визначення рівнів завад, що впливають, при довільному розташуванні джерел завад.

2. Вибір і обґрунтування методів апроксимації нелінійної характеристики високочастотного тракту радіоприймального пристрою.

3. Розробка методики оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах на вхідні каскади радіоприймального пристрою з довільною нелінійністю.

4. Розробка методу розрахунку інтермодуляційних завад при великій розмірності розв'язуваної задачі та знаходження шляхів зниження розмірності.

Об'єкт дослідження: процес виникнення завад інтермодуляції при множинних електромагнітних взаємодіях радіоелектронних засобів.

Предмет дослідження: оцінка рівнів інтермодуляційних завад при множинному впливі завадових сигналів, на вхідні каскади радіоприймального пристрою з високим порядком нелінійності.

Методи досліджень. У роботі використовуються теоретичні й експериментальні методи досліджень. На базі методу функціонального і диференційного аналізу розв'язуються задачі представлення нелінійних високочастотних трактів радіоприймального пристрою функціональними рядами Вольєрра та рядами Тейлора. Методи поліноміальної апроксимації використовуються для опису нелінійних характеристик радіоприймального пристрою. Метод теорії імовірностей необхідний для розробки нових методів оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах. Методи електродинаміки і статистичної радіофізики використовуються для обчислення рівнів сигналів, що заважають, при впливі на вхід радіоприймального пристрою.

Методи програмування та оптимізації на ПЕОМ із використанням середовища розробки програм Borland Developer Studio 2006, Delphi for Microsoft Windows Architect використані для створення програмної реалізації методики визначення рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблена методика оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах на вхідні каскади радіоприймального пристрою з нелінійністю високого порядку та проведена оцінка розмірності розв'язуваної задачі, що забезпечує більшу точність розрахунків.

2. Одержав подальший розвиток метод підвищення точності розрахунку інтермодуляційних завад, заснований на представленні характеристики нелінійного елемента високочастотного тракту РПП декількома зонами з різними характеристиками нелінійності.

3. Одержав подальший розвиток метод скорочення розмірності розв'язуваної задачі, заснований на поетапній оцінці виникнення інтермодуляційних завад від формованих підмножин РЕЗ, сигнали яких істотно впливають на рівень інтермодуляційних завад.

Практичне значення отриманих результатів:

Для розробленої методики оцінки рівнів ІЗ при множинних впливах розроблена програмна реалізація в середовищі Borland Developer Studio 2006, Delphi for Microsoft Windows Architect, що дозволяє:

1) оперативно робити оцінку електромагнітної сумісності при розташуванні додаткових радіоелектронних засобів на функціонуючому об'єкті;

2) досліджувати ЕМС із заданим ступенем точності в радіослужбах з великим завантаженням частотного ресурсу в умовах ближнього розташування й в умовах з високою концентрацією РЕЗ;

3) у залежності від поразки смуги частот приймання радіоприймального пристрою інтермодуляційними завадами обґрунтовано робити вибір робочих каналів;

4) у стільникових системах зв'язку з частотним розподілом каналів при частотно-територіальному плануванні виділяти групи частот несучих коливань шляхом виявлення «інтермодуляційно сумісних» і «інтермодуляційно несумісних» частотних каналів.

Результати роботи впроваджені і використовуються:

1. У Центральному казенному конструкторському бюро „Протон” (акт Центрального казенного конструкторського бюро „Протон” № 538 від 10.07.2007):

- Методика оцінки інтермодуляційних завад при множинних впливах близько розміщених радіоелектронних пристроїв.

- Програмна реалізація методики щодо розрахунків рівня інтермодуляційних завад.

2. У Харківському обласному радіотелевізійному передавальному центрі (акт ХОРТЩ від 16.07.2007):

- Методика оцінки інтермодуляційних завад при множинних впливах близько розміщених РЕЗ.

- Програмна реалізація запропонованої методики дозволила при установці додаткових радіоелектронних засобів зв'язку на функціонуючому об'єкті оперативно визначати рівні інтермодуляційних завад.

3. У Харківському національному університеті радіоелектроніки (акт ХНУРЕ від 26.07.07):

- На лекціях і практичних заняттях з дисципліни „Методи забезпечення ЕМС”

4. У Харківському університеті Повітряних Сил (акт ХУПС від 17.08.2007):

- На лекціях і практичних заняттях з дисципліни „Технічна експлуатація військової техніки зв'язку та радіотехнічного забезпечення Повітряних сил” використовують методику оцінки рівня інтермодуляційних завад при множинній дії на вхідні каскади з високим порядком нелінійності, яка дозволяє обґрунтовано вибирати місце розташування РЕЗ і допустимі частоти приймання/передавання інформації.

- На лекціях і практичних заняттях з дисципліни „Військова техніка авіаційної радіолокації” використовують методи розрахунку інтермодуляційних завад при наявності ансамблеві завадових дій.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві й опублікованих у виданнях, що ввійшли в перелік ВАК України, авторові належать: у роботі [1] результати моделювання динаміки стану розподілу ресурсів між елементами систем абонентського радіодоступу при різних матрицях малих параметрів, що визначають інтенсивність радіоелектронних взаємодій; у роботі [9] результати визначення нелінійних передатних функцій за допомогою рекурентного методу.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися на наукових семінарах кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ, а також на 4-х Міжнародних конференціях і 4-х Міжнародних форумах. Усі виступи на тему дисертації.

Публікації. Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 роботах, а саме: у 5 статтях наукових видань, 4-х тезах Міжнародних конференцій, 4-х тезах Міжнародних форумів, що входять до переліку ВАК України.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 163 сторінки, серед яких 149 сторінок основного тексту, 25 ілюстрацій, 10 таблиць, 1 додаток на 4 сторінках. Список використаних джерел із 97 найменувань на 10 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, її наукова новизна і практичне значення, сформульовані мета та задачі роботи, наведено її загальну характеристику.

У **першому розділі** проведено аналітичний огляд існуючих методик, методів аналізу і критеріїв оцінки ЕМС. Існуючі методики та методи аналізу ЕМС по інтермодуляційних завадах, засновані на парній або груповій оцінці. При цьому групова оцінка припускає виділення й урахування трьох основних завад, які впливають на вхід радіоприймального пристрою з множини вхідних впливів. Таким чином, ці підходи зводяться до розгляду двосигнальної або трисигнальної інтермодуляційної завади, що при множинних впливах не дозволяє забезпечувати достатню точність оцінки ефектів інтермодуляції. У 70% випадків взаємні завади обумовлені інтермодуляцією, яка виникає у вхідних каскадах РПП. Огляд існуючих методик аналізу електромагнітної сумісності в угрупованнях РЕЗ показав, що на цей час відсутні ефективні методи оцінки інтермодуляційних завад, які є наслідком впливу нелінійності високочастотного тракту радіоприймального пристрою при множинних впливах. З аналізу випливає, що для підвищення точності оцінки ЕМС необхідно розробити нову методику оцінки інтермодуляційних завад, яка має враховувати множинний характер впливів. Інтерполяція прохідної характеристики нелінійності довільного порядку призводить до необхідності розв'язування задачі великої розмірності

У **другому розділі** досліджуються причини виникнення і способи оцінки результатів нелінійних перетворень, що виникають у високочастотних трактах радіоприймального пристрою: блокування корисного сигналу, перехресні спотворення і інтермодуляція.

Ефекти блокування і перехресних спотворень проявляються тим сильніше, чим вище амплітуди завад і ступінь нелінійності амплітудних і фазових характеристик активних елементів. Інтермодуляції є нелінійним процесом, який обумовлений дією двох чи більше сигналів інших радіостанцій у неосновних каналах приймання і проявляється як завада в основному каналі.

Аналіз кількісних показників що характеризують нелінійні ефекти, показав, що вплив інтермодуляції виявляється вже при малих рівнях сигналу, що свідчить про сприйнятливість радіоприймального пристрою більш до інтермодуляційних завад, чим до завад, які обумовлюють блокування і перехресні спотворення. Таким чином, інтермодуляцію можна вважати однією з найбільш важливих проблем забезпечення ЕМС РЕЗ.

Існуючі методи оцінки потужності інтермодуляційних завад дозволяють враховувати двосигнальну ІЗ не вище 5-го порядку і трисигнальну ІЗ не вище 3-го порядку, що є недостатнім в умовах множинних впливів сигналів, що заважають, на вході радіоприймального пристрою зі значною зміною рівнів групового сигналу.

Для обчислення рівнів ІЗ необхідно мати аналітичний вираз для нелінійної прохідної характеристики високочастотного тракту. Цей вираз можна одержати шляхом апроксимування експериментальних даних або знайти в результаті теоретичного аналізу.

Найбільш часто використовують такі методи апроксимації нелінійних характеристик: кусочно-лінійну, функціональну, ступінчасту. При кусочно-лінійній апроксимації відбувається наближена заміна реальної характеристики відрізками прямих ліній з різними нахилами. Функціональна апроксимація використовується в тих випадках, коли вдається підібрати функціональну залежність вихідної величини від вхідної, або ця залежність задана апіорі.

Ступінчаста апроксимація заснована на розкладанні нелінійної характеристики в ряд Тейлора, в околиці робочої точки x_0 :

$$y = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

де a_0, a_1, a_2, \dots – коефіцієнти ряду. Кількість членів ряду залежить від необхідної точності розрахунків. При $x_0 = 0$ і обмежуючись розкладанням до n -го коефіцієнта ряду, одержимо: $y = f(z) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$. Очевидно, що підвищення ступеня апроксимуючого полінома дозволяє підвищити точність розрахунків ІЗ.

У **третьому розділі** розроблена методика, яка дозволяє оцінювати рівні інтермодуляційних завад, які утворюються на виході нелінійного елемента

радіоприймального пристрою при множинних впливах на його вході. Отримана методика дозволяє враховувати вплив радіоприймального тракту зі значним ступенем нелінійності на груповий сигнал.

Метод обчислення рівнів ІЗ, який заснований на опису нелінійної характеристики рядами Вольтера, враховує інерційність нелінійного елемента радіоприймального пристрою. Урахування інерційності є важливим, якщо виникає необхідність оцінювати ступінь спотворення сигналу за рахунок різних фазових зрушень його спектральних складових. Для розв'язання даної задачі оцінка спотворення форми сигналу є неістотним параметром, оскільки для визначення впливу завади інтермодуляції на якість приймання корисного сигналу, достатнім є визначення області частот, уражених інтермодуляційними завадами і значення їхньої потужності. При використанні цього способу опису нелінійної характеристики досить складно визначити передатні функції. Для обчислення передатної функції необхідно мати дані за принциповою схемою нелінійного елемента і всього ланцюга в цілому. Розроблювачі сучасних радіоприймальних засобів не надають таку інформацію у явному вигляді.

Тому запропоновано використовувати більш доступний метод визначення рівнів ІЗ, заснований на представленні нелінійної характеристики рядом Тейлора в околиці заданої робочої точки.

Характеристика нелінійного елемента описується функцією $f(U_{ex})$. Сигнал, що надходить на вхід нелінійного елемента має вигляд:

$$U_{ex} = u_0 + u = u_0 + \sum_{i=1}^n u_i \cos(\omega_i t + \varphi_i), \quad (2)$$

де u_i і φ_i - відповідно амплітуда і фаза i -ої частотної складової вхідного сигналу; u_0 - визначає обрану робочу точку НЕ.

Характеристика нелінійного елемента $f(U_{ex})$ представляється рядом Тейлора з кінцевим числом членів ряду:

$$f(U_{ex}) = k_0 + k_1 u + k_2 u^2 + k_3 u^3 + \dots + k_s u^s, \quad (3)$$

де $u = \sum_{i=1}^n u_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$; $k_s = \frac{f^s(u_0)}{s!}$, $f^s(u_0)$ - похідна порядку s в обраній робочій точці. Коефіцієнти k_s визначають крутість нелінійної характеристики.

Очевидно, що сигнал на виході НЕ складається з множини комбінаційних частот. Будь-яку комбінаційну частоту, що утвориться в результаті впливу на вхід n сигналів $(b_1 \omega_1 + b_2 \omega_2 + \dots + b_n \omega_n)$, зручно задати набором коефіцієнтів $[b_1, b_2, \dots, b_n]$, що приймають значення цілих позитивних і негативних чисел, а також нулів. Величину, що визначає порядок комбінаційної частоти, можна знайти за формулою:

$$q = \sum_{n=1}^n |b_i| . \quad (4)$$

Задана набором коефіцієнтів $[b_1, b_2, \dots, b_n]$ комбінаційна частота порядку q міститься в спектрі вихідного сигналу тільки в тому випадку, якщо серед коефіцієнтів, що задають характеристику НЕ є хоча б один $k_s \neq 0$ при $s \geq q$ та $s, q \in$ числами однієї парності, без обмеження спільності можна вважати, що хоча б одне $b_j > 0$ для $j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Набори коефіцієнтів b_n , якими задаються комбінаційні частоти, є сумою позитивних і негативних співмножників a_i', a_i'' (5), що розташовані перед частотами ω_i з індексами i , ($i = \overline{1, n}$) у цілих ненегативних числах при даному s ; $\varphi = (b_1 \varphi_1 + \dots + b_n \varphi_n)$ – фаза:

$$\begin{cases} a_1' - a_1'' = b_1 \\ a_2' - a_2'' = b_2 \\ \dots \\ a_n' - a_n'' = b_n \\ a_1'' + a_2'' + \dots + a_n'' = \frac{1}{2} \left(s - \sum_{i=1}^n b_i \right) \end{cases} . \quad (5)$$

Кількість ненегативних розв'язків системи (5), знаходиться в результаті заміни коефіцієнтів b_i їхніми модулями $|b_i|$; число таких розв'язків буде дорівнювати числу розбивок величини $Q' = \frac{1}{2} \left(s - \sum_{i=1}^n |b_i| \right) \geq 0$ на n ненегативних доданків і складе $C_{Q'+n-1}^{n-1}$. Загальне число розв'язків системи (4) дорівнює C_{Q+n-1}^{n-1} ,

$$C_{Q+n-1}^{n-1} > C_{Q'+n-1}^{n-1}, \text{ тому що } Q > Q', \left(Q = \frac{1}{2} \left(s - \sum_{i=1}^n b_i \right) \right).$$

Остаточний вид формули для розрахунку амплітуди і фази будь-якої комбінаційної частоти і постійної складової на виході нелінійної системи, яка описана рядом Тейлора, має вигляд:

$$u_{[b_1, b_2, \dots, b_n]} = \sum_{i=0}^{\left[\frac{s_m - q}{2} \right]} \frac{k_{2s+q}}{2^{2s+q-1}} \cdot (2s+q)! \cdot \sum_{i=0}^{C_{q'+n-1}^{n-1}} \frac{u_1^{2a_{1_i}^{(s)} + |b_1|} \dots u_n^{2a_{n_i}^{(s)} + |b_n|}}{a_{1_i}^{(s)}! \dots a_{n_i}^{(s)}! (|b_1| + a_{1_i}^{(s)}) \dots (|b_n| + a_{n_i}^{(s)})}, \quad (6)$$

де $a_{1_i}^{(s)} \dots a_{n_i}^{(s)}$ – i -е розв'язання системи лінійних рівнянь (5).

Для постійної складової $u_{вих0}$ вираз (6) приймає вигляд:

$$u_{вих0} = f(u_0) + U[0, \dots, 0] = f(u_0) + \sum_{s=0}^{\left\lfloor \frac{s_m}{2} \right\rfloor} \frac{k_{2s+q}}{2^{2s+q}} \cdot (2s+q)! \cdot \sum_{i=0}^{C_{q+n-1}^{n-1}} \frac{u_1^{2a_{1i}^{(s)}} \dots u_n^{2a_{ni}^{(s)}}}{\left(a_{1i}^{(s)}!\right)^2 \dots \left(a_{ni}^{(s)}!\right)^2}. \quad (7)$$

Для енергетичного розрахунку рівнів сигналів, що впливають на вхід радіоприймального пристрою від РЕЗ що заважають, обґрунтована й обрана модель COST 231 Хата. Відповідно до цієї моделі розрахунок загасань при розповсюдженні радіохвиль проводиться в залежності від відстані між передавальною і приймальною антенами.

Для оцінки розмірності розв'язуваної задачі необхідно визначити загальну кількість інтермодуляційних складових N , які утворюються на виході нелінійного елемента. Кінцевий вигляд цього виразу описується формулою:

$$N = 1 + \sum_{k=1}^{\min(m,s)} 2^{k-1} C_m^k C_s^k, \quad k \in [1; \min(m,s)], \quad (8)$$

де s – найвищий ступінь полінома, що апроксимує характеристику нелінійного елемента; m – кількість вхідних сигналів вигляду (2).

Розмірність розв'язуваної задачі, у свою чергу, впливає на розрахунковий час визначення параметрів інтермодуляційних завад.

Рис.1. Залежність розрахункового часу t від кількості вхідних сигналів N при різних ступенях апроксимуючого полінома s

На рис. 1 представлена залежність часу розрахунку параметрів комбінаційних складових, які утворюються на виході нелінійного елемента, в залежності від кількості вхідних сигналів при різних ступенях апроксимуючого полінома. З графіка видно, що ступінь апроксимуючого полінома слабо впливає на розрахунковий час. Головним параметром, що збільшує розмірність задачі і час розрахунку, є параметр N – кількість вхідних сигналів. У реальних умовах на вхід радіоприймального пристрою, який розміщено, наприклад, на одній опорі з іншими РЕЗ, впливає велика кількість сигналів, кількість яких може перевищувати 100. При такому значенні кількості вхідних сигналів і ступеня апроксимуючого полінома, наприклад, $s=7$, час розрахунку на ПЕВМ Core 2 Duo 1,2 GHz, Dual Memory 2*1 Gb 800 MHz складе 311 040 годин, що відповідає 36 рокам. Очевидно, що такий показник розрахункового часу є неприпустимим. У залежності від оптимального часу розрахунку за графіком можна визначити граничні вихідні дані – максимально припустиму кількість вхідних сигналів N , що впливають на нелінійний елемент радіоприймального пристрою і ступінь апроксимуючого полінома, що описує нелінійну характеристику. З урахуванням того, що ступінь апроксимуючого

полінома слабо впливає на розрахунковий час, для більш точного опису характеристики нелінійного елемента можна обмежитися ступенем апроксимуючого полінома $s=7$. При кількості вхідних сигналів $N=10$ розрахунковий час складає 10 хвилин, що є прийнятним для проведення розрахунків.

Якщо N набагато більше допустимого значення, необхідно ввести додаткові методи скорочення часу розрахунків. На першому етапі пропонується провести частотний відбір, який полягає в перевірці збігу частот джерел завад і каналів приймання радіоприймального пристрою, а також визначити рівень їхньої потужності. При виявленні на цьому етапі РЕЗ, сигнали яких попадають у смугу прийому з рівнем вище припустимого значення завади, наступний розрахунок необхідно припинити, оскільки в даному угрупованні ЕМС заздалегідь не забезпечується. На другому етапі пропонується виконати ранжирування сигналів за величиною потужності сигналу, що надходить на вхід досліджуваного РЕЗ. Рівень сигналів, що надходять на вхід досліджуваного радіоприймального пристрою P_1, P_2, \dots, P_N , наводиться з урахуванням втрат у середовищі поширення і з урахуванням ослаблення сигналів у частотно-селективних вхідних трактах досліджуваного РЕЗ. Далі виявляються РЕЗ, сигнали яких заважають і при попаданні на вхід досліджуваного приймача мають найбільшу потужність. Нижній граничний рівень потужності сигналів, що враховуються, відповідає рівневі на 30 дБ нижче чутливості радіоприймача. Таким чином, у розрахунку враховуються сигнали, потужність яких має найбільше значення і, відповідно, у випадку появи завад інтермодуляції, найбільший внесок у рівень завади, що утворилися, будуть вноситися сигналами цих РЕЗ. З урахуванням обмежень, що накладаються обчислювальним ресурсом ПЕОМ і вихідними граничними даними, спочатку запропоновано зробити розрахунок рівнів інтермодуляційних завад, що створюють перші десять РЕЗ у варіаційному ряді, які розташовані один від одного через один, починаючи з першого, потім через один починаючи з другого і т.д. доти, поки не будуть враховані всі РЕЗ. Якщо на одному з проміжних етапів рівень ІЗ є неприпустимим, то подальший розрахунок можна припинити. Якщо рівні ІЗ є припустимими, то необхідно визначити, сигнали яких РЕЗ роблять значний внесок в утворення отриманих завад, а номери РЕЗ зафіксувати. На заключному етапі відбувається розрахунок рівнів ІЗ від РЕЗ, що вносили значний внесок в утворення ІЗ на попередніх розрахункових етапах і були зафіксовані. Крім того, при розрахунку враховують сигнали, частоти яких були розташовані в безпосередній близькості від сигналів тих РЕЗ, що вносили найбільший вклад в утворення завади інтермодуляції.

Коефіцієнти k_1, k_2, \dots, k_s істотно залежать від положення робочої точки U_0 на характеристиці НЕ (рис.2).

Рис. 2 Вплив сукупності сигналів на НЕ РПП

Якщо на вхід нелінійного елемента впливає сумарний сигнал, амплітуда якого виходить за межі деякої ділянки, що знаходиться в околиці робочої точки U_0 , то це означає, що характеристика нелінійності не буде відповідати тій, для якої було зроблене розкладання в ряд Тейлора.

Таким чином, для більш коректного виконання розрахунків запропоновано розбити прохідну характеристику на ділянки, в межах яких можна вважати характеристику нелінійності незмінною, тобто необхідно вибрати n робочих точок, для кожної з яких знаходиться розкладання в ряд Тейлора і при виході амплітуди сигналу за межі відповідної ділянки використовувати відповідний опис нелінійності. Для інженерних розрахунків представляється достатнім вибір трьох робочих точок, одна з яких U_0 знаходиться на лінійній ділянці, а дві інших U_0' , U_0'' – по краях характеристики на рис. 3.

При малому рівні сумарного сигналу розмах амплітуди буде знаходитись в межах другої зони, а імовірність його попадання в першу і третю зону буде зневажливо мала. У цьому випадку досить буде використовувати розкладання в ряд Тейлора тільки в околиці робочої точки U_0 . При великому рівні сигналу необхідно враховувати характеристики нелінійності на першій і третій ділянках з вагою імовірності попадання сигналу на ці ділянки.

Для знаходження цієї імовірності досліджено дві моделі виконання розрахунків опису, що відрізняються методом щільності розподілу миттєвих значень групового сигналу, при множинному впливі на вхід досліджуваного РПП. Перша модель, заснована на припущенні, що сума сигналів, яка впливає на нелінійний елемент, має нормальний розподіл щільності імовірності миттєвих значень. Таке припущення справедливе, якщо кількість сигналів, що впливають, досить велика, а їхні рівні мають один порядок (тобто сигнали приблизно однакової потужності). Якщо ж дані припущення не виконуються, тобто один або декілька сигналів за величиною значно більші за інші, то закон розподілу буде істотно відрізнятися від нормального і навіть мати багатомодовий характер. У цьому випадку можна на підставі моделі вхідного впливу побудувати сигнал, для якого чисельними методами визначити щільність імовірності його миттєвих

значень, а імовірність перебування в першій і третій зонах оцінити чисельними методами – чисельним інтегруванням отриманої щільності імовірності в інтервалі $[-\infty, U_1]$ для першого інтервалу і $[U_2, +\infty]$ для другого інтервалу. Передбачається, що щільність імовірності миттєвих значень розподілені по нормальному закону, що по суті не змінює методику оцінки інтермодуляційних завад.

Рівень інтермодуляційних завад на заданій частоті визначається як:

$$U_{I\Sigma}(f) = \sqrt{P_1 \cdot U_{I_1}^2(f) + P_2 \cdot U_{I_2}^2(f) + P_3 \cdot U_{I_3}^2(f)}, \quad (8)$$

де $U_{I_n}(f)$ - амплітуда інтермодуляційної завади на частоті f , обчислена при розкладанні в ряд Тейлора нелінійної характеристики в околиці n -ої робочої точки. P_i – імовірність попадання сумарного сигналу на n -у ділянку прохідної характеристики.

У **четвертому розділі** запропоновано алгоритм програмної реалізації методики розрахунку рівнів ІЗ для угруповання РЕЗ, що виконується в середовищі Borland Developer Studio 2006, Delphi for Microsoft Windows Architect. Розрахунки проводилися для реального угруповання РЕЗ, розміщеного на вежі Харківського обласного радіотелевізійного передавального центру. Даний об'єкт дозволяє повною мірою оцінити ступінь вірогідності проведених розрахунків щодо забезпечення ЕМС РЕЗ в умовах великої кількості ($N=82$) компактно розташованих джерел випромінювання. Результати розрахунку можуть бути підтверджені прямими вимірами.

Реалізація алгоритму припускає виконання наступних основних дій:

1) уведення вихідних даних – параметри об'єкта, основними з яких є: типи, призначення і кількість усіх встановлених на об'єкті радіозасобів; номінали робочих частот передавання/приймання всіх радіозасобів; потужність вихідного випромінювання передавача; висоти установки РЕЗ у напрямку основного випромінювання антен; основні характеристики досліджуваного радіоприймального засобу; опис прохідної характеристики нелінійного елемента високочастотного тракту радіоприймального пристрою;

2) визначення рівнів сигналів, що заважають, з урахуванням моделі Хата;

3) опис прохідної характеристики радіоприймального тракту з використанням розкладання в ряд Тейлора в околиці заданої робочої точки (1);

4) виконання розрахунків ІЗ при великій розмірності розв'язуваної задачі – частотний відбір; ранжирування за рівнями потужності вхідних впливів, що заважають; зниження розмірності розв'язуваної задачі; виконання розрахунків інтермодуляційних завад при обмеженій розмірності розв'язуваної задачі;

5) інтерпретація отриманих результатів.

Розрахунки виконувалися в припущенні, що на вежі Харківського обласного радіотелевізійного передавального центру буде встановлюватися радіоприймальний пристрій стандарту 802.16 на висоті 135м: діапазон робочих частот 2,3 – 2,5 ГГц; чутливість -76 дБм; подавлення завад по сусідньому каналу – 30 дБ. Згідно обраного критерію максимально припустимого рівня завади:

$$P_{n\text{доп}} = -106 - 30 = -136 \text{ дБВт}$$

При проведенні розрахунків прохідна характеристика радіоприймального пристрою стандарту 802.16 мала вигляд, представлений на рис. 3.

Рис. 3. Прохідна характеристика ВЧ тракту радіоприймального пристрою стандарту 802.16

У припущенні, що груповий завадовий сигнал не виходить за межі лінійної ділянки (другої зони), було виявлене угруповання РЕЗ, що при впливі на НЕ РПП призводить до виникнення інтермодуляційних завад (рис. 4,5).

Рис. 4. Завади інтермодуляції в смузі пропускання РПП стандарту 802.16 при його розміщенні на висоті 135 метрів

Рис. 5. Перевищення завадою інтермодуляції припустимого рівня в смузі пропускання РПП стандарту 802.16 при його розміщенні на висоті 135 метрів

Аналіз результатів розрахунку показує, що не на всіх ділянках діапазону роботи РПП стандарту 802.16 можливе якісне приймання сигналів. Для усунення завад необхідне проведення відповідних організаційно-технічних заходів.

Для оптимального розміщення досліджуваного радіоприймального засобу в угрупованні РЕЗ необхідно радіоприймач 802.16, який розташований на телевізійній вежі, перенести з висоти 135 метрів (для якої раніше виконувався розрахунок рівнів ІЗ) на висоту 160 метрів.

З результатів розрахунків випливає, що для зони відповідної лінійної ділянки рівні ІЗ при розташуванні РПП на висоті 160 м істотно нижче за рівні ІЗ при розташуванні на висоті 135 м. Це дозволяє зробити висновок про доцільність виконання більш точних розрахунків ІЗ, при попаданні групового сигналу на нелінійні ділянки (зона 1 і зона 3).

Рис. 6. Завади інтермодуляції, що попадають у смугу пропускання радіоприймального пристрою стандарту 802.16 при його розміщенні на висоті 160 м

Рис. 7. Перевищення завадою інтермодуляції припустимого рівня в смузі пропускання РПП стандарту 802.16 при його розміщенні на висоті 160 метрів

Таким чином, угруповання складене з 82 РЕЗ не призводить до виникнення завад інтермодуляції у всьому частотному діапазоні роботи радіоприймального пристрою стандарту 802.16. З рис. 6 і рис. 7 випливає, що рівень утворених ІЗ нижче значення обраного показника, обумовленого критерієм максимально припустимого рівня завади. Це уможливило розміщення радіоприймального пристрою стандарту 802.16 у даній точці.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача, що полягає в розробці методики оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах сигналів, що заважають, на вхідні каскади радіоприймального пристрою.

На основі розробленої методики досліджене реальне угруповання радіоелектронних засобів, яке розташоване на вежі Харківського обласного радіотелевізійного передавального центру, у припущенні, що на діючому об'єкті буде встановлено новий радіоелектронний засіб стандарту 802.16. Методика дозволила оцінити електромагнітну обстановку діючого угруповання РЕЗ на вежі, ступінь поразки смуги частот приймання інтермодуляційними завадами і дозволила зробити обґрунтований вибір місця розташування радіоелектронного засобу стандарту 802.16 на вежі.

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження дозволили одержати ряд нових наукових результатів, що мають практичне значення:

1. Вперше розроблена методика оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах на вхідні каскади радіоприймального пристрою з нелінійністю високого порядку та проведена оцінка розмірності розв'язуваної задачі, що забезпечує більшу точність розрахунків.

2. Одержав подальший розвиток метод підвищення точності розрахунку інтермодуляційних завад, заснований на представленні характеристики нелінійного

елемента високочастотного тракту РПП декількома зонами з різними характеристиками нелінійності.

3. Одержав подальший розвиток метод скорочення розмірності розв'язуваної задачі, заснований на поетапній оцінці виникнення інтермодуляційних завад від формованих підмножин РЕЗ, сигнали яких істотно впливають на рівень інтермодуляційних завад.

4. Для розробленої методики оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах була розроблена програмна реалізація в середовищі Borland Developer Studio 2006, Delphi for Microsoft Windows Architect, що дозволяє:

1) оперативно робити оцінку електромагнітної сумісності при розташуванні додаткових радіоелектронних засобів на функціонуючому об'єкті;

2) досліджувати ЕМС із заданим ступенем точності в радіослужбах з великим завантаженням частотного ресурсу в умовах ближнього розташування й в умовах з високою концентрацією РЕЗ;

3) у залежності від поразки смуги частот приймання радіоприймального пристрою інтермодуляційними завадами обґрунтовано робити вибір робочих каналів;

4) у стільникових системах зв'язку з частотним розподілом каналів при частотно-територіальному плануванні виділяти групи частот несучих коливань, шляхом виявлення «інтермодуляційно сумісних» і «інтермодуляційно несумісних» частотних каналів.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Коляденко Ю.Ю., Величко Т.В. Модель динамики неравновесных состояний при распределении ресурсов в сети абонентского радиодоступа //Радиотехника, Всеукр. Межвед. Научн.-Техн. Сб. 2005. Вып. 142; с. 34—39

2. Величко Т.В. Методы повышения эффективности передачи информации в условиях наличия «скрытого узла» в системах абонентского радиодоступа стандарта IEEE 802.11 // Тез. докл. 9-й Международный молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке» 19-21 апреля 2005 г. Харьков. С. 72

3. Величко Т.В. Методы борьбы с коллизиями в беспроводных системах // 1-й Международный радиоэлектронный Форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ–2005.сб. Науч. Трудов. Том 4. Харьков. АН ПРЭ. ХНУРЭ. 2005 г. С. 523-526

4. Дорошенко Т.В. Методы оценки влияния интермодуляционных помех в транкинговых системах связи. // Материалы первой международной конференции «глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» 3-6 октября 2006г. Харьков-Туапсе С. 382

5. Doroshenko T.V. Reseach of nonlinear properties of systems, Based on Means of Methods of Numbers by Volterr // Modern problems of radioengineering telecommunications and computer science February 28-March 4 2006, Lviv-Slavske, Ukraine, PP. 600

6. Дорошенко Т.В. Методика определения количества комбинационных составляющих на выходе нелинейного элемента при полигармоническом воздействии // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал ХАІ 3 (15), липень-вересень, 2006, С. 38-40

7. Дорошенко Т.В. Методика определения вероятности ошибочного приёма кодового слова в беспроводных системах, использующих скачкообразную перестройку частоты для передачи информации // Тез. докл. 10-го Юбилейного Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке» 10-12 апреля 2006 г. Харьков. С. 97

8. Дорошенко Т.В. Групповая оценка электромагнитной совместимости компактно расположенных радиоэлектронных средств // Проблемы информатики и моделирования. Материалы шестой международной научно-технической конференции, 23-25 ноября 2006, Харьков. С. 40

9. Дорошенко Т.В., Селиванов К.А. Определение параметров выходного сигнала приёмника сигналов с помощью рядов Вольтерра // Радиотехника, Всеукр. Межвед. Научн.-Техн. Сб. 2006. Вып. 144; с. 182—186

10. Дорошенко Т.В. Анализ методов определения параметров комбинационных составляющих на выходе нелинейного элемента радиоприёмного устройства систем абонентского радиодоступа // Материалы 11-го Международного молодёжного форума «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке», 10-12 апреля 2007, Харьков. С. 88

11. Дорошенко Т.В. Результаты исследования возникновения интермодуляционных помех в транкинговых системах и в системах абонентского радиодоступа при их совместной работе // Праці науково-практичної конференції „Перспективні технологічні та ринкові напрями розвитку телекомунікаційних послуг у новітніх беспроводових системах зв'язку”, Одеса 2007. С. 40-42

12. Дорошенко Т.В. Методика определения параметров комбинационных составляющих на выходе нелинейного элемента радиоприёмного устройства

системы абонетского радиодоступа // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. 2007. Вып. 148; с.171-176

13. Дорошенко Т.В. Оцінка інтермодуляційних перекручувань випадкових сигналів // Системи озброєння і військова техніка. Науковий журнал 3 (6) 2006 С.86-90

Анотація

Дорошенко Т.В. Методи оцінки інтермодуляційних завад при множинних впливах на вхідні каскади радіоприймального пристрою - Рукопис.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 - телекомунікаційні системи і мережі – Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2007.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає в розробці методики оцінки рівнів інтермодуляційних завад при множинних впливах сигналів на вхідні каскади радіоприймального пристрою. У дисертації запропоновані методи підвищення точності розрахунку рівнів інтермодуляційних завад високих порядків, заснованих на представленні характеристики нелінійного елемента високочастотного тракту радіоприймального пристрою декількома зонами з різними характеристиками нелінійності. Для скорочення розмірності розв'язуваної задачі запропоновано проводити поетапну оцінку виникнення інтермодуляційних завад від формованих підмножин РЕЗ, сигнали яких істотно впливають на рівень цих завад.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, інтермодуляційна завада, нелінійність високочастотного тракту, радіоприймальний пристрій, угруповання радіоелектронних засобів зв'язку, ступінчата апроксимація, розмірність розв'язуваної задачі.

Аннотация

Дорошенко Т.В. Методы оценки интермодуляционных помех при множественных воздействиях на входные каскады радиоприёмного устройства - Рукопись.

Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 - телекоммуникационные системы и

сети – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2007.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача, которая заключается в разработке методики оценки уровней интермодуляционных помех при множественных воздействиях мешающих сигналов на входные каскады радиоприёмного устройства.

Разработанная методика, в отличие от существующих, позволяет учитывать нелинейность входных каскадов радиоприёмного устройства высоких порядков и позволяет решить задачу большой размерности, которая не реализуется при использовании прямых вычислений.

Повышение точности расчёта интермодуляционных помех, основано на представлении характеристики НЭ высокочастотного тракта РПУ несколькими зонами с различными характеристиками нелинейности. Метод сокращения размерности решаемой задачи, основан на поэтапной оценке возникновения интермодуляционных помех от формируемых подмножеств РЭС, оказывающих существенное влияние на уровень интермодуляционных помех.

На основе разработанной методики, была исследована реальная группировка радиоэлектронных средств, расположенная на башне Харьковского областного радиотелевизионного передающего центра. Программная реализация методики в среде Borland Developer Studio 2006, Delphi for Microsoft Windows Architect, позволяет: оперативно производить оценку ЭМС при установке дополнительных РЭС на функционирующем объекте; исследовать ЭМС с заданной степенью точности в радиослужбах с большой загрузкой в условиях ближнего расположения и в условиях с высокой концентрацией РЭС; в зависимости от поражения полосы частот приёма радиоприёмного устройства интермодуляционными помехами, обоснованно производить выбор каналов для передачи сигналов; в сотовых системах связи с частотным разделением каналов при частотно-территориальном планировании выделять группы частот несущих колебаний из предоставляемых для системы диапазонов радиочастот, путём выявления «интермодуляционно совместимых» и «интермодуляционно несовместимых» частотных каналов.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, интермодуляционная помеха, нелинейность высокочастотного тракта, радиоприёмное устройство, группировка радиоэлектронных средств связи, степенная аппроксимация, размерность решаемой задачи.

Abstract

Doroshenko T.V. Methods of an estimation intermodulations handicapes at plural influences on entrance cascades of the radioreception device - The manuscript.

Ph.D. thesis by speciality 05.12.02 – telecommunication systems and networks – The Ukrainian state academy of a railway transportation, Kharkov, 2007.

In dissertational work the actual scientifically-applied problem which consists in development of a technique of an estimation of levels intermodulations handicapes at plural influences of stirring signals on entrance cascades of the radioreception device is solved. The developed technique, in difference from existing, allows to consider nonlinearity of entrance cascades of the radioreception device of high orders and allows to solve a problem of the big dimension which is not realized at use of direct calculations. Increase of accuracy of calculation intermodulations handicapes, is based on representation of characteristic nonlinear element of high-frequency path the radioreception device by several zones with various characteristics of nonlinearity. The method of reduction of dimension of a solved problem, is based on a stage-by-stage estimation has arisen intermodulations handicapes from the formed subsets radio-electronic means rendering essential influence on a level intermodulations of handicapes.

Keywords: electromagnetic compatibility, intermodulation a handicap, nonlinearity of a high-frequency path, the radioreception device, a grouping of a radio-electronic communication facility, sedate approximation, dimension of a solved problem.

Українська державна академія залізничного транспорту

ДОРОШЕНКО ТЕТЯНА ВАЛЕРІЇВНА

УДК 621.391.827

**МЕТОДИ ОЦІНКИ ІНТЕРМОДУЛЯЦІЙНИХ ЗАВАД ПРИ МНОЖИННИХ
ВПЛИВАХ НА ВХІДНІ КАСКАДИ РАДІОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерства освіти і науки України.

<i>Науковий керівник</i>	кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Коляденко Юлія Юрївна , Харківський національний університет радіоелектроніки, старший науковий співробітник кафедри телекомунікаційних систем.
<i>Офіційні опоненти:</i>	<p>доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Микола Миколайович, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, завідувач кафедри прикладної електродинаміки;</p> <p>кандидат технічних наук, доцент Харченко Віктор Миколайович, Центральне казенне конструкторське бюро „Протон”, заступник директора по науковій праці.</p>

Захист відбудеться " 21 " листопада 2007 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01 в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий " 19 " жовтня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої заради Д 64.820.01
кандидат технічних наук, доцент

Приходько С.І.