

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ОБ'ЄКТОВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ

В статті запропонована методика аналізу об'єктової електромагнітної сумісності, що призначена для визначення можливого взаємного впливу групи радіоелектронних засобів зв'язку, що розташовані в умовах обмеженого простору.

Коваленко І.Г. Методика анализа объектовой электромагнитной совместимости средств связи. В статье предложена методика анализа объектовой электромагнитной совместимости, которая предназначена для определения возможного взаимного влияния группы радиоэлектронных средств связи, расположенных в условиях ограниченного пространства.

I. Kovalenko Evaluation method of electromagnetic compatibility telecommunication means on a local facility. In this article presented the technique of analysis of object electromagnetic compatibility which is intended for definition possible mutual influence of group of the group radio-electronic means, which are located in limited space conditions.

Ключові слова: радіоелектронний засіб, електромагнітна сумісність.

В останні роки спостерігається значне зростання кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ), що використовуються. В умовах міста для установки антен найчастіше використовуються окремі об'єкти: дахи висотних будинків, спеціальні щогли або вежі. Незважаючи на те, що розташовані на одному даху антени працюють, як правило, у різних діапазонах частот, найбільшу небезпеку представляють завади, що формуються в приймачі внаслідок нелінійності характеристик їх трактів: інтермодуляційні завади та завади за рахунок блокування приймача [1 – 2].

Оцінка об'єктової електромагнітної сумісності (ЕМС) є однією з головних завдань, що вирішуються при проектуванні розміщення РЕЗ (при зміні характеристик його випромінювання) на об'єкті, на якому вже розгорнуто декілька антен інших РЕЗ. Основна проблема розрахунків ЕМС складається у відсутності єдиних методик та алгоритмів розрахунку параметрів об'єктової ЕМС, прийнятих на державному рівні. Міжнародний союз електрозв'язку пропонує ряд рекомендацій, які дозволяють вирішувати окремі часткові завдання розрахунку, але не вирішують задачу в цілому [3 – 8]. Запропонована методика дозволяє вирішити задачу аналізу (розрахунку параметрів) об'єктової електромагнітної сумісності РЕЗ спеціального призначення та розробити на її основі відповідні алгоритми та програмне забезпечення [9].

Запропонована методика призначена для визначення можливого взаємного впливу групи РЕЗ, що розташовані в умовах обмеженого простору. Вона може використовуватись для оцінки можливих завад приймачу внаслідок блокування та інтермодуляції при відсутності завад, що попадають безпосередньо в головний канал прийому.

Відповідно до методики пропонується проводити аналіз для кожного окремого приймача з розглянутої групи РЕЗ. У рамках розглянутого завдання використовується модель приймача, структурна схема якого зображена на рис. 1.

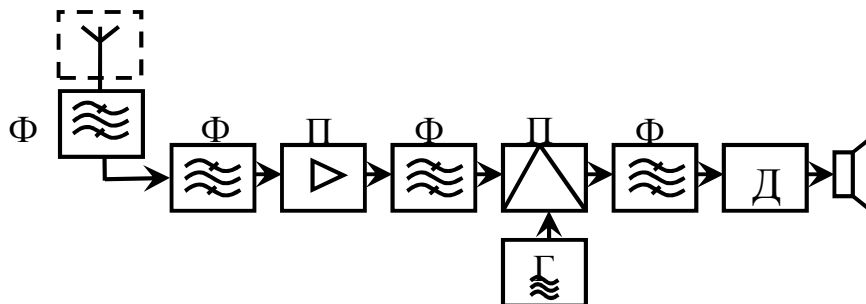


Рис. 1. Структурна схема приймача

На Рис.1. позначені: Ф1 – фільтр, що моделює частотну залежність коефіцієнта підсилення антени, Ф2 – фільтр попередньої селекції, П – підсилювач радіочастоти, Ф3 – фільтр радіочастоти, Ф4 – фільтр проміжної частоти, що реалізує основну вибірковість приймача, ПЧ – перетворювач частоти (змішувач), Г – гетеродин, Д – демодулятор.

Опис методики аналізу об’єктові електромагнітної сумісності.

В якості критеріїв виконання умов ЕМС пропонується використовувати нерівності:

$$P_{\Pi} < P_{\text{пд}} \quad \text{та} \quad P_{\text{іо}} + P_{\text{із}} < P_{\text{ід}},$$

де: P_{Π} та $P_{\text{пд}}$ – сумарна та максимальна припустима сумарна потужність завод на вході підсилювача радіочастоти; $P_{\text{іо}}$, $P_{\text{із}}$ – сумарна потужність складових інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти, що надійшла на вхід змішувача на частоті відповідно основного та дзеркального каналів; $P_{\text{ід}}$ – максимальна припустима сумарна потужність продуктів інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти.

Вихідні дані.

Для рішення завдання оцінки умов об’єктові ЕМС необхідно задати наступні вихідні дані приймача, що досліджується:

- частота настройки основного тракту прийому f_0 , МГц;
- характеристики вибірковості фільтрів Ф1, Ф2 і Ф4 – $K_1(f-f_0)$, $K_2(f-f_0)$ і $K_4(f-f_0)$, дБ;
- величина загасання фільтра Ф3 на частоті дзеркального каналу $L_{\text{зк}}$, дБ;
- чутливість приймача P_R , дБВт;
- мінімальне необхідне співвідношення сигнал/завада на виході тракту ПЧ – A_0 , дБ;
- коефіцієнт підсилення антени $G_{\text{мах}}$, дБ;
- діаграми спрямованості антени в горизонтальній і вертикальній площинах для хвиль зі співпадаючою та ортогональною поляризацією – $G_{\text{гс}}(\varphi)$, $G_{\text{вс}}(\varphi)$, $G_{\text{го}}(\varphi)$, $G_{\text{во}}(\varphi)$, дБ;
- поляризація антени;
- орієнтація максимумів діаграм спрямованості прийомної антени в горизонтальній і вертикальній площинах (магнітний азимут і кут місця) – α і β , град;
- загасання в прийомному антенному фідері – η , дБ;
- максимальна припустима потужність завод на вході підсилювача радіочастоти – $P_{\text{пд}}$, дБВт;
- критичний рівень нелінійності підсилювача по інтермодуляції 3-го порядку – $P_{\text{зп}}$, дБВт;
- відносні величини критичних рівнів нелінійності підсилювача по інтермодуляції n -го порядку – $\Delta P_{\text{нп}}$, дБ.

Для кожного i -го передавача завод ($i = \overline{1, I}$, I – кількість передавачів) повинні бути відомі:

- центральна частота випромінювання завади – f_{0i} , МГц;
- вид спектра випромінюваної завади – $S_i(f-f_{0i})$, дБ;
- потужність завади на вході приймача $P_{\text{вхі}}$, дБВт, що може бути обмірювана або розрахована.

Для розрахунку $P_{\text{вхі}}$ необхідно додатково знати наступні параметри:

- потужність передавача – $P_{\text{прді}}$, дБВт;
- загасання в передавальному антенному фідері – η_I , дБ;
- коефіцієнт підсилення антени передавача – $G_{\text{махі}}$, дБ;
- діаграми спрямованості передавальної антени в горизонтальній і вертикальній площинах – $G_{\text{гі}}(\varphi)$, $G_{\text{ві}}(\varphi)$, дБ;
- поляризація антени;
- орієнтація максимумів діаграм спрямованості передавальної антени в горизонтальній і вертикальній площинах (магнітний азимут і кут місця) – α_i і β_i , град;
- відстань між електричними центрами передавальної й приймальної антен – d_i , м;

– магнітний азимут і кут місця напрямку на електричний центр прийомної антени із точки розташування електричного центра передавальної антени – α_{ir} і β_{ir} , град.

Етапи методики.

Вирішення завдання оцінки умов виконання об'єктової ЕМС розділяється на наступні етапи:

1. Розрахунок (вимір) величин і форм спектрів завад на вході приймача.

$$P_{vxi} = P_{прдi} + G_i(\alpha_i - \alpha_{ir}, \beta_i - \beta_{ir}) - \eta_i + G(\alpha - 180 - \alpha_{ir}, \beta - 180 - \beta_{ir}) K_1(f_{0i} - f_0) - \eta - L(d_i, f_{0i}), \quad (1)$$

де: $G_i(\alpha_i - \alpha_{ir}, \beta_i - \beta_{ir})$ – коефіцієнт підсилення антени передавача завад у напрямку антени приймача завад, дБ;

$G(\alpha - 180 - \alpha_{ir}, \beta - 180 - \beta_{ir}) K_1(f_{0i} - f_0)$ – коефіцієнт підсилення антени приймача в напрямку на антену i -го передавача на частоті передавача, розрахований з урахуванням поляризації антен передавача та приймача, дБ.

Величини $G(\alpha, \beta)$, що використовуються в (1), можуть бути отримані:

$$G(\alpha, \beta) = G_{\max}(\alpha G_r(\gamma) + \beta G_v(\gamma)) / (\alpha + \beta),$$

де γ – просторовий кут між напрямком максимуму діаграми спрямованості антени в просторі та напрямком віддаленим від нього на α градусів в горизонтальній площині та на β градусів в вертикальній площині. Визначається як

$$\gamma = \arccos(\cos\alpha \cos\beta).$$

$L(d_i, f_{0i})$ в (3) – втрати при розповсюдженні електромагнітної хвилі від антени передавача завад до антени приймача, дБ. Визначається за формулою

$$L(d_i, f_{0i}) = 22 + 20 \lg(d_i f_{0i} / 300).$$

У результаті виконання першого етапу розрахунків повинні бути відомі форми спектрів і величини всіх завад на вході приймача.

2. Розрахунок сумарної потужності завад на вході підсилювача радіочастоти.

Потужність кожної з завад на виході підсилювача радіочастоти може бути визначена як

$$P_{ni} = P_{vxi} - L_{\phi 2i},$$

де $L_{\phi 2i}$ – величина загасання i -ої завади в преселекторі, дБ.

$$L_{\phi 2i} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S_i(f - f_{0i}) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S_i(f - f_{0i}) K_2(f - f_0) df}.$$

В (8) перед виконанням інтегрування величини $S_i(f)$ і $K_2(f)$ повинні бути переведені з логарифмічного в абсолютний масштаб.

Сумарна потужність завад на вході підсилювача радіочастоти розраховується як

$$P_{\Pi} = \sum_{i=1}^I P_{ni},$$

де I – загальна кількість завад, що враховують

На цьому етапі розрахунку визначається також форма спектра всіх завад, що, у загальному випадку, змінюється після проходження через фільтр преселектора.

$$S_{ni}(f - f_{0i}) = S_i(f - f_{0i}) K_2(f - f_0),$$

Після нормування всіх спектрів завад, виконуваних операцією

$$\bar{S}_{ni}(f - f_{0i}) = \frac{S_{ni}(f - f_{0i})}{\max\{S_{ni}(f - f_{0i})\}}$$

для кожного нормованого спектра завади визначається його нижня та верхня частота (f_{ni} і f_{vi}), що відповідають зменшенню спектральної щільності завади на величину $L_{сщ}$, дБ. Значення $L_{сщ}$ є параметром розрахунку, залежить від точності подання спектра у вихідних даних і може прийматися рівним – 60, – 70 або – 80 дБ.

3. Визначення сполучень завод, які формують на виході підсилювача радіочастоти продукти інтермодуляції на частотах основного та дзеркального каналів.

Для визначення потенційно небезпечних сполучень частоти до N -го порядку здійснюється перебір всіх можливих комбінацій з I -завод за схемою

$$n_1 p_1 + n_2 p_2 + n_3 p_3 + \dots + n_i p_i + \dots + n_I p_I \quad (2)$$

де
$$\sum_{i=1}^I abs(n_i) \leq N, \quad (3)$$

p_i – i -та завада, n_i – цілі числа.

Для кожної j -ї комбінації отриманої відповідно до (2) і (3) визначається нижня f_{Hj} і верхня f_{Bj} частота результуючого спектра

$$f_{Hj} = \sum_{i=1}^I n_i f'_{ni}, \quad (4)$$

$$f_{Bj} = \sum_{i=1}^I n_i f'_{bi}, \quad (5)$$

де
$$f'_{ni} = \begin{cases} f_{ni}, n_i > 0 \\ f_{bi}, n_i < 0 \end{cases}, \quad f'_{bi} = \begin{cases} f_{bi}, n_i > 0 \\ f_{ni}, n_i < 0 \end{cases}.$$

Якщо при проведенні розрахунків по (4) і (5) обох величини f_{Hj}^i і f_{Bj}^i приймають негативні значення, то результуючу вихідну та кінцеву частоту необхідно перерахувати як

$$\begin{cases} f_{Hj} = -f_{Bj} \\ f_{Bj} = -f_{Hj} \end{cases}.$$

Якщо негативне значення приймає тільки одна з величин f_{Hj} і f_{Bj} , то результуючу початкову частоту варто приймати $f_{Hj} = 0$, а результуюча верхня частота буде дорівнює

$$f_{Bj} = \max \{abs(f_{Hj}), abs(f_{Bj})\}.$$

Ті сполучення частот, для яких результуючий спектр продуктів інтермодуляції перетинається зі смугами частот основного або дзеркального каналів є потенційно небезпечними і для них виконується подальший розрахунок.

4. Визначення величин і форм спектрів продуктів інтермодуляції на виході підсилювача радіочастоти.

Для визначення форми спектра продуктів інтермодуляції N -го порядку необхідно $N-1$ раз зробити операцію згортки спектрів завод, що беруть участь у формуванні розглянутого продукту, відповідно до (2).

Вираз $P_a + P_b$ ($a, b \in 1..I$) складових з (2) відповідає результуючому спектру:

$$S_{ab}(f_c - f_{0ab}) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}_{na}(f - f_{0a}) \bar{S}_{nb}(f_c - f - f_{0b}) df \quad (6)$$

де
$$f_{0ab} = f_{0a} + f_{0b}. \quad (7)$$

Якщо у виразі (2) один з коефіцієнтів n_i приймає негативне значення, операція згортки виконується аналогічно виразу (6), з наступними виправленнями:

1) при розрахунку результуючої центральної частоти по (7) відповідна центральна частота береться зі знаком мінус;

2) перед розрахунком спектра по (6) вид спектра i -ї завади, з якої використовується негативний коефіцієнт, інвертується відповідно до виразу :

$$S_{i \text{ инв}}(f - f_{0j}) = S_i(f_{0j} - f).$$

Для розрахунку величин j -ї складової інтермодуляції n -го порядку на виході підсилювача радіочастоти відповідно (2) використовується наступна загальна формула :

$$P_{cj} = \sum_{i=1}^I abs(n_i) P_{ni} + a_n + K_n,$$

де n_i – коефіцієнти розкладання поліному (2) для потенційно небезпечного j -го сполучення частот; a_n – коефіцієнт перетворення обумовлений порядком інтермодуляційної складової та критичним рівнем нелінійного підсилювача по інтермодуляції n -го порядку, дБ; K_n – поправочний коефіцієнт, обумовлений внутрішнім розподілом завад, що беруть участь в утворенні продукту інтермодуляції, дБ.

Коефіцієнт a_n визначається за допомогою значення критичного рівня нелінійного підсилювача по інтермодуляції n -го порядку P_{np} :

$$a_n + n P_{np} = P_R.$$

З огляду на те, що у величинах вихідних даних P_{np} можна виразити як:

$$P_{np} = P_{3п} + \Delta P_{np}.$$

Вираз для a_n має вигляд

$$a_n = P_R - n (P_{3п} + \Delta P_{np}).$$

Поправочний коефіцієнт K_n можна виразити

$$K_n = 20 \lg \frac{C_n(n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_l)}{2^{n-1}}.$$

де $C_n(n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_l)$ – поліноміальний коефіцієнт, у формуванні якого беруть участь абсолютні значення коефіцієнтів з вираження (2), і який може бути визначений як

$$C_n(n_1, n_2, n_3, \dots, n_i, \dots, n_M) = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3! \dots n_i! \dots n_l!}.$$

5. Визначення сумарної потужності продуктів інтермодуляції на виході фільтра ПЧ.

Для визначення сумарної потужності продуктів інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти необхідно знайти величини загасання кожного продукту інтермодуляції при проходженні його через фільтр проміжної частоти.

$$L_{\phi 4j} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S_{cj}(f - f_{0cj}) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S_{cj}(f - f_{0cj}) K_4(f - f_0) df}.$$

У результаті для продуктів інтермодуляції радіочастоти, що утворяться на виході підсилювача, на частоті основного каналу прийому значення потужності на виході фільтра ПЧ визначається формулою

$$P_{oj}^i = P_{cj} - L_{\phi 4j},$$

а для продуктів інтермодуляції, що утворяться на частоті дзеркального каналу прийому

$$P_{дзj}^i = P_{cj} - L_{дзк} - L_{\phi 4j}.$$

У такий спосіб сумарна потужність продуктів інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти виражається як

$$P^i = P_{o}^i + P_{дз}^i = \sum_{k=1}^{K_0} P_{ok}^i + \sum_{l=1}^{L_{дз}} P_{дзl}^i, \quad (29)$$

де K_0 та $L_{дз}$ кількість продуктів інтермодуляції радіочастоти, що утворилися на виході підсилювача, на частотах, відповідно основного та дзеркального каналів.

6. Порівняння розрахованих значень потужностей завад із припустимими .

При одночасному виконанні наступних умов

$$P_{п} < P_{пд} \quad \text{та} \quad (8)$$

$$P^i < P_R - A_o \quad (9)$$

робиться висновок про виконання умов ЕМС відносно розглянутого приймача по блокуванню та інтермодуляції. При невиконанні кожного з нерівностей (8) і (9) робиться вивід про невиконання відповідних умов ЕМС.

Таким чином, запропонована методика дозволяє вирішити задачу визначення об'єктові електромагнітної сумісності РЕЗ спеціального призначення, на її основі були розроблені алгоритми та спеціальне програмне забезпечення визначення електромагнітної сумісності РЕЗ, антени яких розташовані в обмеженому просторі.

Висновок.

Запропонована методика базується та на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку і вперше вирішує „в цілому” задачу оцінки взаємного впливу груп передавачів та приймачів засобів зв'язку, антени яких розташовані на окремих стаціонарних та рухомих об'єктах (спорудах). На основі запропонованої методики було розроблене алгоритми та спеціальне програмне забезпечення розрахунків параметрів об'єктові електромагнітної сумісності, яке успішно використовується спеціальними користувачами радіочастотного ресурсу України [9].

В подальших дослідженнях пропонується удосконалити методику та відповідні алгоритми для врахування особливостей та характеристик окремих РЕЗ спеціального призначення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Седельников Ю.В. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Казань. ЗАО „Новое знание”, 2006. – 304 с.
2. Бузов А.Л. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем / Под редакцией Быховского М.А. – М.: Эко-Трендз. – 2006. – 376 с.
3. Рекомендация МСЭ-R SM.1134-1 (2007). Расчет интермодуляционных помех в сухопутной подвижной службе.
4. Рекомендация МСЭ-R SM.337-6 (2008). Частотный и территориальный разнос.
5. Рекомендация МСЭ-R F.699 „Эталонные диаграммы излучения антенн радиорелейных станций для использования при изучении вопросов оценки помех”;
6. Рекомендация МСЭ-R S.465-5 „ Эталонные диаграммы излучения антенн ЗС для использования при изучении вопросов координации и оценки помех в диапазоне частот от 2 до 30 ГГц”;
7. ANSYS Electromagnetic field analysis guide! ANSYS Inc, 1998r.
8. Carlo Muscas, Power quality monitoring in modern electric distribution systems //IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, October 2010, p. 19 – 27.
9. Корсак В.Ф., Максименко Ю.Л., Лягоскін О.В., Коваленко І.Г. „Програмний комплекс аналізу об'єктові електромагнітної сумісності”, матеріали 17-ї Міжнародної конференції „СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології”, 2006 р., с. 363 – 364.