

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ

У статті запропоновані методики аналізу електромагнітної сумісності (ЕМС), що призначені для визначення можливого взаємного впливу групи радіоелектронних засобів (РЕЗ) зв'язку. Запропоновані методики базуються на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ). Особливістю розроблених методик є їх орієнтація на практичну реалізацію для отримання комплексного рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку. Також, особливістю методик є зменшення складності розрахунків шляхом поділення аналізу на два етапи – попередній та детальний. На попередньому етапі здійснюється вибір і аналіз ЕМС РЕЗ за частотно-територіальною ознакою. На етапі детального аналізу проводяться розрахунки ЕМС з урахуванням можливого впливу побічних та інтермодуляційних випромінювань, а також можливості блокування приймачів при розташуванні групи РЕЗ в обмеженому просторі. Запропоновані методики передбачають зменшення обсягу складних розрахунків для окремих складових задач аналізу ЕМС, які вимагають надлишок точних вихідних даних, при відсутності частини яких складні розрахунки за запропонованими МСЕ методиками можуть привести до неприйнятних результатів.

Ключові слова: радіоелектронний засіб, електромагнітна сумісність.

Актуальність. Останнім часом спостерігається тенденція перевантаження радіочастотного спектру внаслідок розвитку радіотехнологій, збільшення кількості радіозасобів. Тому постає актуальною задача забезпечення якісного функціонування цих засобів у спільних та суміжних діапазонах радіочастот [1-4]. Для вирішення цієї задачі необхідно застосовувати методи та методики прогнозування електромагнітної обстановки та аналізу електромагнітної сумісності (ЕМС).

Загальні підходи та окремі методики вирішення задач даного класу викладені в множині рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ) [2]. Але запропоновані рекомендації не дають комплексного рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку, дозволяють проводити окремі складні розрахунки для складових (часткових) задач аналізу ЕМС та вимагають багато точних вихідних даних (щодо параметрів устаткування, рельєфу, параметрів розповсюдження радіохвиль тощо). При відсутності частини цих вихідних даних (або зниженні їх точності) складні розрахунки за запропонованими МСЕ методиками можуть привести до неприйнятних результатів, що ускладнює оперативного вирішення задач даного класу.

Задача дослідження – розробка методик, призначених для аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів шляхом проведення практичних розрахунків її параметрів.

Вихідні дані. В запропонованих методиках використовуються наступні вихідні дані.

1. Множина з РЕЗ з відповідними технічними характеристиками:

- тип РЕЗ (аналоговий, цифровий сигнал);
- потужність пристрою, що передає, P , дБВт;
- спектральні характеристики сигналу, що випромінюється $S(f)$;
- коефіцієнт підсилення антени G , її тип, поляризація випромінювання і втрати в антенно-фідерному тракті η ;
- характеристика спрямованості антени $g(\alpha)$;
- клас випромінювання;
- ширина смуги пропускання приймача по проміжній частоті на рівні -30 дБ, МГц і форма амплітудно-частотної характеристики;
- чутливість приймача, дБВт, мВ/м, (коефіцієнт шуму, дБ);

- швидкість цифрового потоку, біт/с;
- припустимий рівень помилок і величина захисного відношення для заданого відсотку часу.

2. *Смуги частот, які використовуються.*

3. *Характеристики місць розташування об'єктів РЕЗ:*

- географічні координати місця розташування РЕЗ, градуси, хвилини, секунди північної широти, східної довготи;

- висота основи РЕЗ над рівнем моря, м;

- висота підвісу антени над рівнем Землі, м.

4. *Характеристики місцевості:* висота над рівнем моря та покриття (вода, рослинність тощо).

Для виконання завдань з аналізу електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку (ЗР) в залежності від типу РЕЗ, умов їх функціонування та розташування пропонується використовувати ряд пов'язаних між собою розроблених методик (рис.1):

I. Методика аналізу ЕМС засобів радіозв'язку фіксованої радіослужби (ФР) [5].

II. Методика аналізу ЕМС засобів радіозв'язку рухомої радіослужби (РР) [6].

III. Методика аналізу об'єктової ЕМС засобів радіозв'язку [7].



Рис. 1

Основним критерієм для визначення електромагнітної сумісності РЕЗ в розроблених методиках використовується *енергетичний критерій*, який виражається відношенням сигнал/(шум+завада) при заданих показниках якості, що представляється у вигляді коефіцієнта ослаблення завад (коефіцієнта втрат) при вирішенні задач ЕМС РЕЗ [8-11]:

$$\frac{P_c}{P_3} = A(\Delta f) = A_0 N(\Delta f), \quad (1)$$

де $A(\Delta f)$ – захисне відношення при заданій частотній розлад Δf між корисним сигналом і завадою для визначеного відсотку часу; A_0 – захисне відношення по суміщеному каналу для визначеного відсотку часу; $N(\Delta f)$ – коефіцієнт, який характеризує ослаблення завади в залежності від частотного розладу між корисним сигналом і завадою; P_c – потужність корисного сигналу на вході приймача, який зазнає впливу завад, яка дорівнює (в вільному просторі).

Необхідні захисні відношення $A(\Delta f)$, A_0 в (1) залежать від флуктуації рівнів сигналів на вході приймача, які є випадковими величинами, їх закон розподілення для різних відсотків часу точно невідомий. В Рекомендаціях МСЭ-R приведені наближені залежності відсотку часу перевищення глибини завмирань для найгіршого місяця року.

В загальному випадку, наприклад, для аналогових РРЛ з частотною модуляцією (ЧМ), коли безперервна частина спектру сигналу завади не повністю співпадає з смугою пропускання приймача, ослаблення завади в лінійній частині приймача, за рахунок розладу, враховується коефіцієнтом $N(\Delta f)$. В цьому випадку захисне відношення для 20 % часу дії завад виражається формулою [10]: $A(20\%, \Delta f) = 55 + N(\Delta f)$, а для 0,001 % часу дії завад відповідно: $A(0,001\%, \Delta f) = 25 + N(\Delta f)$. Для практичних розрахунків параметрів ЕМС аналогових РРЛ найбільш доцільно використовувати довідкові дані захисних відношень [12].

Для більшості типів аналогових РРЛ необхідне захисне відношення для 20% складає 55 дБ, а для 0,001% відповідно 25 дБ [12].

На відміну від аналогових РРЛ для цифрових систем показниками якості є допустима величина вірогідності помилок $P_{\text{ош}}$, яка не повинна перевищувати задане значення протягом визначеного відсотку часу любого місяця року, та відповідне необхідне захисне відношення $A_0(P_{\text{ош}})$. В [12] наведені вирази якісних параметрів систем з різними типами цифрової модуляції. Так, для РРЛ з фазо-імпульсним модульованим сигналом величина захисного відношення для 20 % часу, визначається емпіричною формулою [18] $A(20\%, \Delta f)=15+N(\Delta f)$, а для 0,001 % часу відповідно: $A(0,001\%, \Delta f)=18+N(\Delta f)$, для цифрових РРЛ величина захисного відношення для 0,001 % часу розраховується згідно виразу: $A(0,001\%, \Delta f)=25+N(\Delta f)$. Значення величин захисних відношень та значення коефіцієнта $N(\Delta f)$ надані в [12].

Другим критерієм ЕМС для цифрових систем є допустима величина вірогідності помилок $P_{\text{пом}}$, яка не повинна перевищувати задане значення протягом відповідного відсотку часу любого місяця року при відповідному необхідному захисному відношенні $A_0(P_{\text{пом}})$. Так, відповідно до Рекомендації МСЕ-Р F.594 [13] значення імовірності помилок 10^{-3} наприкінці гіпотетичної цифрової РРЛ, довжиною 2500 км, яка складається з 50 прольотів, не повинне перевищувати протягом більш $P_T = 0,054\%$ часу будь-якого місяця року, а значення імовірності помилок $P_{\text{пом}}=10^{-6}$ відповідно протягом більш $P_T = 0,4\%$ часу будь-якого місяця року. Допустимі значення P_T визначені в Рекомендації МСЕ-Р F.634 [14].

Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження

В залежності від частот та умов рельєфу місцевості в методиках використовуються окремі алгоритми розрахунку [5]:

Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження в діапазонах 30-1000 МГц істотно залежить від конкретного профілю траси [10]. Так, наприклад, у випадку відкритої траси втрати ($L_{\text{вт}}$) являють собою втрати вільного простору, що визначені відповідно до формули:

$$L_{\text{вт}} = 32,5 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d),$$

де f – частота, МГц; d – протяжність траси, км.

Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження в діапазонах вище 1000 МГц пропонується проводити відповідно Рекомендації МСЕ-Р Р.452 [10], у якій містяться рекомендації щодо урахування наступних механізмів розповсюдження радіохвиль: розповсюдження у вільному просторі; дифракція; тропосферне розсіювання; аномальне розповсюдження радіохвиль, а також втрати за рахунок забудови (там, де це необхідно).

Формули розрахунків за рекомендаціями МСЕ-Р значно спрощуються, якщо врахувати, що в розроблених методиках практичне значення для розрахунків мають, по-перше, медіанні значення потужності сигналу та завади та, по-друге, відстань між передавачем, що заважає, (або джерелом корисного сигналу) та приймачем не більше 150 км. Перше означає, що $L=L(p=50\%)$; друге – що втратами за рахунок аномального розповсюдження для РРЛ можна знехтувати, так як вони становляться сумірними з втратами за рахунок тропосферного розсіювання та дифракції на трасах протяжністю більше 250-300 км ($10^{-0,2 L_a} = 0$ дБ) [12].

Урахування характеристик та спрямованості антен при розрахунку параметрів ЕМС

Параметри та діаграми спрямованості (ДС) антен, які входять у вирази для розрахунку параметрів ЕМС РЕЗ, найбільш вірогідно визначаються на підставі виміру електродинамічних параметрів антен в конкретному місці установки. Однак при аналізі параметрів ЕМС РЕЗ таких даних найчастіше не буває. Тому для розрахунку ДС пропонується використовувати або аналітичні вирази (відомі з теорії антен та рекомендацій МСЕ), або вирази, що представляють собою апроксимації статистично усереднених ДС антен. В останньому випадку ДС визначається з деяким невеликим запасом, що, у свою чергу, призводить до більш жорстких умов дотримання ЕМС РЕЗ.

I. Методика аналізу електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку фіксованої радіослужби

При побудові методики та відповідного алгоритму були враховані наступні фактори: практичне призначення методики і відповідного алгоритму розрахунків ЕМС РЕЗ та необхідність проведення великої кількості розрахунків. В запропонованій методиці для зменшення часу аналізу (розрахунків) в алгоритмі використано кілька етапів відбору потенційно завадових випромінювань (по частоті, по відстані, по попередньо визначеному рівню сигналу) і виключення з аналізу джерел завад, які не представляють небезпеки функціонуванню приймачу.

Методика включає в себе декілька *етапів*, з яких будується відповідний алгоритм (рис. 2).

1. Введення вихідних даних (груп передавачів, приймачів, джерел корисного сигналу та їх характеристик, розташування тощо).

2. Визначається рівень корисного сигналу. Якщо рівень корисного сигналу не відомий, використовується чутливість приймача, в іншому випадку – розраховується очікуване значення сигналу для приймача, що аналізується.

3. Проводиться відбір РЕЗ, які потенційно можуть створювати завади, за критерієм максимального частотно-територіального рознесення (по заданій максимально можливій відстані та перетином частотних діапазонів між джерелом і рецептором завад). З усього угруповання РЕЗ виділяються РЕЗ, які підлягають подальшому аналізу ЕМС.

4. Для оцінки рівня завад на вході приймача організується проведення почергового аналізу впливу завад окремих випромінювачів (завад) на кожний приймач в угрупованні РЕЗ.

5-7. Проводиться *енергетичний відбір* для обраної пари *передавач-приймач*. Для цього оцінюється рівень сигналу, що заважає, на вході приймача і поріг добору, які визначаються відповідно розділу 1 загального опису методики. Селективні властивості приймача по частоті до уваги не беруться. Після порівняння рівнів завад з порогом, виключаються з розгляду випромінювачі, сигнали яких лежать нижче порогу. На цьому ж етапі виділяються і запам'ятовуються сигнали, які можуть бути причиною нелінійних ефектів (інтермодуляції і гармонік до n -го порядку включно) у приймачі. Розрахунки проводяться окремо для поточного приймача (тільки після завершення аналізу й оцінки ЕМС РЕЗ, до складу якого входить даний приймач, виконується вибір нового приймача і процес аналізу сумісності повторюється з пункту 2).

8-10. На етапі *частотного відбору* встановлюються можливі канали проникнення завади (основний або суміщений канали), розраховується рівень завади на вході приймача, з урахуванням селективних властивостей приймача і знову виконується порівняння з порогом. При цьому слід відмітити, що нелінійні ефекти (гармоніки, інтермодуляція і т. і.) можуть проявлятися при розміщенні РЕЗ на локальних об'єктах (на близьких відстанях). Для спрощення урахування небажаних випромінювань використовується заданий рівень побічних випромінювань передавача (-60 дБ).

11-12. Сигнали, які заважають і пройшли цей етап відбору, підлягають додатковому аналізу і їхній рівень корегується з урахуванням наявних у приймачі засобів подавлення або захисту від завад. Для завад, які визнані потенційно небезпечними, після всіх етапів добору, розраховується необхідне захисне відношення і прогнозоване відношення сигнал/завада відповідно розділу 1 загального опису методики. Потім, виконується їхнє порівняння. Якщо відношення сигнал/перешкода менше необхідного захисного відношення, то розраховується необхідне додаткове ослаблення завади.

13-15. Після завершення аналізу впливу окремих випромінювачів по основному і побічному каналах прийому, у разі необхідності, проводиться розрахунок параметрів нелінійних ефектів, які можуть виникнути в приймачі від сигналів, що заважають, виділених на першому етапі аналізу.

16. Неприятливі результати аналізу, у тому числі й аналізу взаємодії сигналів, що заважають, зберігається для подальшого використання з зазначенням виду нелінійного ефекту і джерел завад, які їх породжують. Інформація про небезпечний випромінювач, канал проникнення завади і необхідне її ослаблення надається посадовій особі, що приймає рішення про надання висновку щодо електромагнітної сумісності РЕЗ. Останній етап методики закінчується після завершення аналізу якості роботи всіх приймачів угруповання РЕЗ, інакше здійснюється перехід до пункту 2.

II. Методика аналізу електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку рухомої радіослужби

Запропонована методика передбачає використання моделі розрахунку, що містить парну і групову оцінку при простій логіці взаємного впливу РЕЗ в угрупованні, яка заснована на імовірнісному (статистичному) підході до оцінки [1]. Проста логіка припускає, що кожен з пристроїв у групі можна розглядати як функціонально незалежний від інших засобів. Запропонована методика може використовуватись при ЧТП для оцінки можливості застосування частотних присвоєнь.

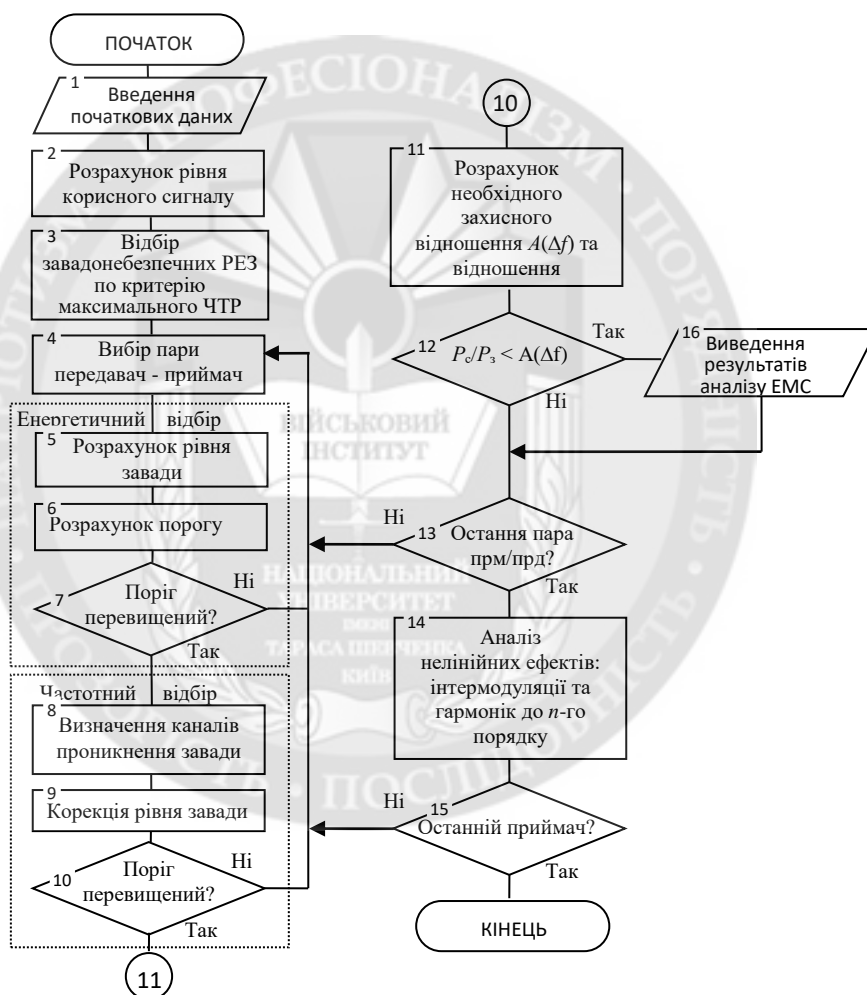


Рис. 2. Загальний алгоритм аналізу EMC РЕЗ фіксованої радіослужби

Розрахунок EMC РЕЗ виконується в наступному порядку:
 вибір РЕЗ по територіальній ознаці, які розміщені в межах обмеженої зони дослідження;

добір з РЕЗ, обраних по територіальній ознаці, що потенційно можуть заважати новому частотному присвоєнню РЕЗ по частотній ознаці;

визначення можливих джерел завад по основному каналу;

визначення можливих джерел завад по першому сусідньому каналу;

визначення можливих джерел завад інтермодуляції 3-го порядку;
розрахунок рівня завад на вході приймача:

- по основному каналу;
- по першому сусідньому каналу;
- інтермодуляції 3-го порядку;

аналіз отриманих результатів і ухвалення рішення за результатами розрахунків про можливість частотного присвоєння з урахуванням впливу множинної завади або необхідності вибору іншої частоти.

Для оптимізації розрахунків пропонується аналіз ЕМС проводити в два етапи: попередній та детальний. На попередньому етапі проводиться попередній відбір та аналіз ЕМС для визначених частот. При детальному аналізі проводиться розрахунок ЕМС з урахуванням впливу побічних випромінювань, можливостей блокування приймача та впливу інтермодуляційних складових завад.

Етапи методики

Загальний алгоритм проведення частото присвоєння та аналізу ЕМС для РЕЗ рухомої радіослужби (рис. 3) містить:

1. Введення початкових даних.
2. Вибір вільної частоти f_{new} в межах розрахункової зони.
3. Вибір діючих РЕЗ в межах розрахункової зони. Вибираються станції, які знаходяться в подвійному радіусі зони обслуговування станції d , для якої визначається частота (рис 4.). Зона обслуговування визначається відповідно до стандарту для даного виду зв'язку і діапазону частот [4].

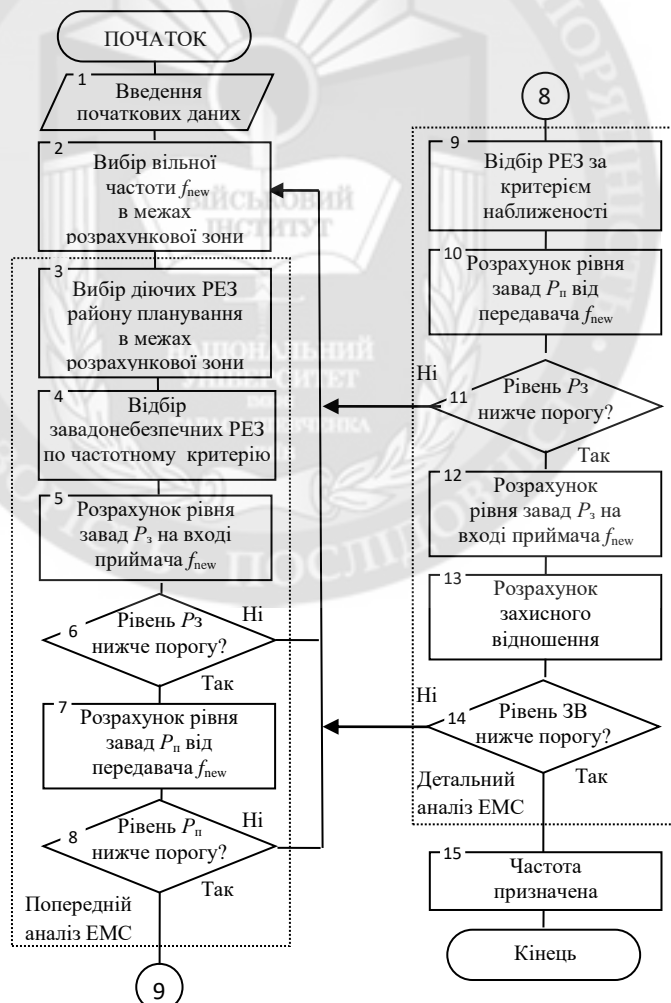


Рис. 3. Загальний алгоритм проведення частото присвоєння та аналізу ЕМС для РЕЗ рухомої радіослужби

4. Відбір завадо небезпечних РЕЗ по частотному критерію проводиться на основі аналізу заводових ситуацій. Базова станція (БС), для якої проводиться частотне планування, разом з мобільною станцією (МС), можуть створювати завади іншим базовим або рухомим станціям, а також зазнавати від них. Тому можуть виникати такі заводові ситуації, які вимагають наступних різних способів розрахунку.

Базова станція БС_i створює завади іншій базовій станції БС. Для визначення відношення сигнал/завада джерело сигналу МС визначається на максимально можливій відстані від БС в межах зони обслуговування (рис. 5). Тоді очікуваний корисний сигнал \underline{P}_k і завада P_3 будуть визначатись:

$$P_k = P_{MC} - L_\Sigma, P_3 = P_{BC_i} - L_{\Sigma_i}$$

де P_{MC} – потужність передавача рухомої станції, P_{BC_i} – потужність передавача базової станції, яка заважає; L_Σ – сумарні втрати розповсюдження сигналу, L_{Σ_i} – сумарні втрати розповсюдження завади.

Базова станція БС_i створює завади мобільній станції МС. Для визначення відношення сигнал/завада рівень прийому рецептора завод МС визначається на лінії, що з'єднує базові станції, на максимальній відстані від джерела сигналу БС і на мінімальній відстані від джерела завади БС_i у межах своєї зони обслуговування (рис. 6). Очікуваний корисний сигнал \underline{P}_k і завада P_3 будуть визначатись:

$$P_k = P_{BC} - L_\Sigma, P_3 = P_{BC_i} - L_{\Sigma_i}$$

де P_{BC} – потужність передавача базової станції.

У випадку якщо зона обслуговування невідома і неможливо визначити рівень очікуваного корисного сигналу, від приймається рівним чутливості МС.

Мобільна станція МС_i створює заваду БС. Для визначення відношення сигнал/завада джерело сигналу МС визначається на максимальній відстані від базової станції БС, а джерело завод МС_i визначається на лінії, що з'єднує базові станції, на максимальній відстані від джерела сигналу БС і на мінімальній відстані від джерела завади БС_i у межах своєї зони обслуговування (рис. 7). Тоді очікуваний корисний сигнал \underline{P}_k і завада P_3 будуть визначатись:

$$P_k = P_{MC} - L_\Sigma, P_3 = P_{MC_i} - L_{\Sigma_i}$$

де P_{MC_i} – потужність передавача мобільної станції завади.

У випадку якщо зона обслуговування невідома і неможливо визначити рівень очікуваного корисного сигналу, він приймається рівним чутливості базової станції.

Мобільна станція МС_i створює заваду іншій мобільній станції МС. Для визначення відношення сигнал/завада рівень сигналу на вході рецептору завод МС визначається на максимальній відстані від джерела сигналу БС і на мінімальній відстані від джерела завади МС_i в межах своєї зони обслуговування (рис. 8). Тоді очікуваний корисний сигнал \underline{P}_k і завада P_3 будуть визначатись:

$$P_k = P_{BC} - L_\Sigma, P_3 = P_{MC_i} - L_{\Sigma_i}$$

У випадку коли зона обслуговування невідома і неможливо визначити рівень очікуваного корисного сигналу, від приймається рівним чутливості рухомої станції

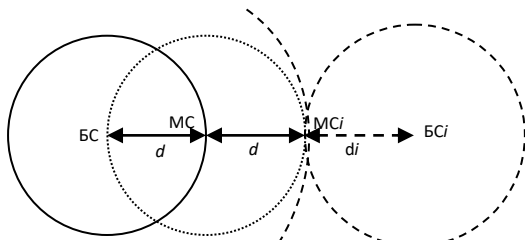


Рис. 4

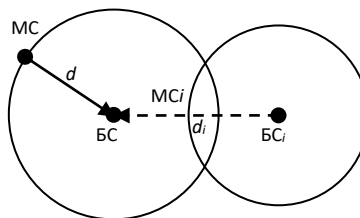


Рис. 5

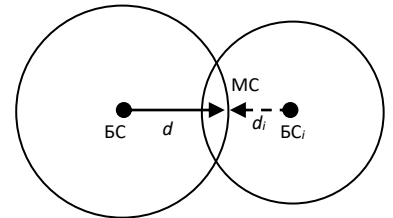


Рис. 6

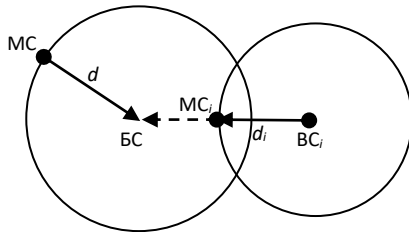


Рис. 7

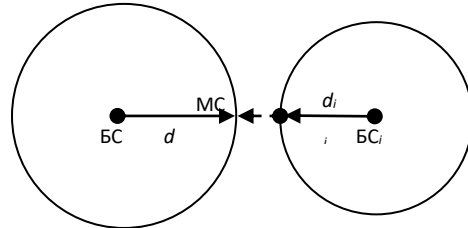


Рис. 8

5. Розрахунок рівня завад P_3 на вході приймача по основному і сусідньому каналах визначається для всіх випадків, визначених в п.4 коли станція, що планується, є станцією приймачем(передавачем) корисного сигналу. У випадку декількох станцій, що заважають, для визначення сумарної завади пропонується використовувати метод складання потужностей [6]:

$$E = 20 \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{E_i}{20}},$$

де E_i – значення напруженості поля для кожного з джерел завад, n – число джерел завад, E – ефективне значення сумарної завади.

6. Аналіз отриманих результатів попереднього розрахунку містить розрахунок відношення сигнал/завада для кожного виду завад. Якщо відношення сигнал/завада нижче визначеного захисного відношення, здійснюється вибір наступної вільної частоти (п.2).

7. Розрахунок рівня завад від передавача аналогічний п.5 для випадків, визначених в п.4 коли завадою є станція, що планується.

8. Аналіз отриманих в п.7 результатів попереднього розрахунку містить розрахунок відношення сигнал/завада. Якщо відношення сигнал/завада нижче визначеного захисного відношення, здійснюється вибір наступної вільної частоти (п.2), інакше здійснюється перехід до детального аналізу.

9. Здійснюється відбір РЕЗ за критерієм наближеності. Для подальших розрахунків обираються РЕЗ в межах радіусу зони обслуговування.

10. Проводиться розрахунок можливих завад від відібраних в п.9 станцій по сусіднім та дзеркальним каналам, завадам на гармоніках та інтермодуляційним завадам. Розрахунок сумарної завади $P_{3\Sigma}$ для кожної станції в межах визначеної зони проводиться відповідно методиці [7] і містить наступні етапи:

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

розрахунок сумарної потужності завад на вході підсилювача радіочастоти.

визначення сполучень завад, які формують на виході підсилювача радіочастоти продукти інтермодуляції на частотах основного та дзеркального каналів.

визначення величин і форм спектрів продуктів інтермодуляції на виході підсилювача радіочастоти.

визначення сумарної потужності продуктів інтермодуляції на виході фільтра ПЧ.

порівняння розрахованих значень сумарних потужностей завад із допустимими:

$$P_{\text{п}} < P_{\text{пд}} \text{ та } P^i < P_R - A_0,$$

де P_{Π} (P_{Π}) – сумарний (допустимий) рівень завад на вході приймача, P^i – сумарний рівень інтермодуляційних складових завад; P_R – чутливість приймача; A_0 – захисне відношення.

При одночасному виконанні вищевказаних умов робиться висновок про виконання умов ЕМС відносно розглянутого приймача по блокуванню та інтермодуляції. При невиконанні кожної з вищевказаних нерівностей робиться вивід про невиконання відповідних умов ЕМС.

11. Якщо нове частотне присвоєння призводить до перевищення порогу сумарною завадою, здійснюється перехід до вибору нової частоти (п.2).

12. Окремо проводиться аналіз об'єктової електромагнітної сумісності для приймача РЕЗ, що планується, відповідно методиці [7] (аналогічно п.10).

13. Визначається необхідне захисне відношення для приймача РЕЗ, що планується, з урахуванням частотної вибірковості приймача.

14. При перевищенні сумарною завадою визначеного рівня порогу для завад, здійснюється перехід до вибору нової частоти (п. 2).

15. Робиться позитивний висновок про можливість частотного призначення.

III. Методика аналізу об'єктової електромагнітної сумісності засобів зв'язку

Запропонована методика призначена для визначення можливого взаємного впливу групи РЕЗ, що розташовані в умовах обмеженого простору [7]. 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. 8.



Рис. 9. Структурна схема приймача

На рис. 9 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.

В якості критеріїв виконання умов ЕМС пропонується використовувати нерівності:

$$P_{\Pi} < P_{\Pi d} \text{ та } P_{i0} + P_{i3} < P_{i d},$$

де: P_{Π} та $P_{\Pi d}$ – сумарна та максимальна припустима сумарна потужність завад на вході підсилювача радіочастоти; P_{i0} , P_{i3} – сумарна потужність складових інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти, що надійшла на вхід змішувача на частоті відповідно основного та дзеркального каналів; $P_{i d}$ – максимальна припустима сумарна потужність продуктів інтермодуляції на виході фільтра проміжної частоти.

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.
2. Розрахунок сумарної потужності завад на вході підсилювача радіочастоти.
3. Визначення сполучень завад, які формують на виході підсилювача радіочастоти продукти інтермодуляції на частотах основного та дзеркального каналів.

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

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

6. Порівняння розрахованих значень потужностей завад із припустимими.

При одночасному виконанні наступних умов: $P_{\text{п}} < P_{\text{пд}}$ та $P^i < P_R - A_o$ робиться висновок про виконання умов ЕМС відносно розглянутого приймача по блокуванню та інтермодуляції. При невиконанні кожного з нерівностей робиться висновок про невиконання відповідних умов ЕМС.

Висновки. Запропоновані методики базуються на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку. Особливістю розроблених методик є їх орієнтація на практичну реалізацію для отримання комплексного рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку. Особливістю методик також є зменшення складності розрахунків шляхом поділення аналізу на два етапи – попередній та детальний. На попередньому етапі здійснюється вибір і аналіз ЕМС РЕЗ за частотно-територіальною ознакою. На етапі детального аналізу проводяться розрахунки ЕМС з урахуванням можливого впливу побічних та інтермодуляційних випромінювань, а також можливості блокування приймачів при розташуванні групи РЕЗ в обмеженому просторі. Також запропоновані методики передбачають зменшення обсягу складних розрахунків для окремих складових (часткових) задач аналізу ЕМС, які вимагають надлишок точних вихідних даних (щодо параметрів устаткування, рельєфу, параметрів розповсюдження радіохвиль тощо), при відсутності частини яких (або зниженні їх точності) складні розрахунки за запропонованими МСЄ методиками можуть привести до неприйнятних результатів.

На основі запропонованих методик проводиться розробка алгоритмів та спеціального програмного забезпечення (ПЗ) аналізу ЕМС РЕЗ для подальшого використання користувачами РЧР України.

В подальших дослідженнях пропонується удосконалити методики та відповідні алгоритми для врахування особливостей та характеристик окремих РЕЗ.

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. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу/ За ред. В.Г.Кривуци та Т.М.Наритника. – К.:ДУІКТ, 2012.
4. Регламент радиосвязи. Международный союз электросвязи. – Женева, 2012.
5. Коваленко І.Г. Методика аналізу електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку фіксованої радіослужби спеціального призначення // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2014. – № 1. – С. 21 – 29.
6. Коваленко І.Г. Методика аналізу електромагнітної сумісності засобів радіозв'язку рухомої радіослужби спеціального призначення // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2015. – № 1. – С. 35 – 41.
7. Коваленко І.Г. Методика аналізу об'єктової електромагнітної сумісності засобів зв'язку // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ", 2013. – № 2. – С. 28 – 33.
8. Рекомендация МСЭ-R P.370-7 (1995). VHF FND UHF PROPAGATION CURVES FOR THE FREQUENCY RANGE FROM 30 MHz TO 1000 MHz.
9. Рекомендация МСЭ-R P.526-10 (2007). Распространение волн за счет дифракции.
10. Рекомендация МСЭ-R P.452-15 (2013). Процедура прогнозирования для оценки микроволновых помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,7 ГГц.
11. Рекомендация МСЭ-R P.341-5 (1999). Концепция потерь передачи для радиолиний.
12. Промежуточный отчет о НИР "Радиочастотное обеспечение создания системы спутниковой связи Украины", НПВФ "Банкомсвязь", Киев, 1994.

13. Рекомендация МСЭ-R F.594-4 (1997) Допустимые коэффициенты ошибок по битам на выходе гипотетического эталонного цифрового тракта для радиорелейных систем, которые могут составлять часть цифровой сети с интеграцией служб.

14. Рекомендация МСЭ-R F.634-4 (1997) Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых радиорелейных линий, составляющих часть цепи высокого качества в цифровой сети с интеграцией служб.

REFERENCES:

1. Sedel'nykov Ju.V. *Электromagnytnaja sovmestymost' radyoэлектронных средств*. — Kazan'. ZAO "Novoe znanye, 2006. — 304 s.
2. Buzov A.L. *Upravlenye radyochastotnym spektrom y elektromagnytnaja sovmestymost' radyosystem / Pod redakcyey Vyhovskogo M.A.* — M.: Эко-Trendz. — 2006. — 376 s.
3. *Teorija i praktyka upravlinnja vykorystannjam radiochastotnogo resursu/ Za red. V.G.Kryvucy ta T.M.Narytnyka.* — K.:DUIKT, 2012.
4. *Reglament radyosvjazy. Mezhdunarodnyj sojuz электросвязи.* — Zheneva, 2012.
5. Kovalenko I.G. *Metodyka analizu elektromagnitnoi' sumisnosti zasobiv radiozv'jazku fiksovanoj' radiosluzhby special'nogo pryznachennja // Zbirnyk naukovyh prac' VITI NTUU "KPI", 2014. — № 1. — S. 21 – 29.*
6. Kovalenko I.G. *Metodyka analizu elektromagnitnoi' sumisnosti zasobiv radiozv'jazku ruhomoi' radiosluzhby special'nogo pryznachennja // Zbirnyk naukovyh prac' VITI NTUU "KPI", 2015. — № 1. — S. 35 – 41.*
7. Kovalenko I.G. *Metodyka analizu ob'jektivoj' elektromagnitnoi' sumisnosti zasobiv zv'jazku // Zbirnyk naukovyh prac' VITI NTUU "KPI", 2013. — № 2. — S. 28 – 33.*
8. *Rekomendacyja MSЭ-R P.370-7 (1995). VHF FND UHF PROPAGATION CURVES FOR THE FREQUENCY RANGE FROM 30 MHz TO 1000 MHz.*
9. *Rekomendacyja MSЭ-R P.526-10 (2007). Rasprostranjenje voln za schet dyfrakcyi.*
10. *Rekomendacyja MSЭ-R P.452-15 (2013). Procedura prognozyrovannya dlja ocenky mykrovolnovykh pomeh mezhdu stancyjamy, nahodjashhymysja na poverhnosti Zemly , na chastotah vyshе pryblыzitel'no 0,7 GGc*
11. *Rekomendacyja MSЭ-R R.341-5 (1999). Koncepcyja poter' peredachy dlja radyolynyj.*
12. *Promezhutochnyj otchet o NYR “Radyochastotnoe obespechenje sozdannya systemy sputnykovoј svjazy Ukrainy”, NPVF “Bankomsvjaz”, Kyev, 1994.*
13. Рекомендация МСЭ-R F.594-4 (1997) Допустимые коэффициенты ошибок по битам на выходе гипотетического эталонного цифрового тракта для радиорелейных систем, которые могут составлять часть цифровой сети с интеграцией служб.
14. Рекомендация МСЭ-R F.634-4 (1997) Показатели качества по ошибкам для реальных цифровых радиорелейных линий, составляющих часть цепи высокого качества в цифровой сети с интеграцией служб.

Рецензент: д.т.н., с.н.с., **Сова О.Я.**, начальник кафедры “Бойового застосування автоматизованих систем управління військами” Військового інституту телекомунікацій та інформатизації

к.т.н. Коваленко И.Г., Мищенко А.А., Вавасова О.С.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СРЕДСТВ РАДИОСВЯЗИ

В статье предложены методики анализа электромагнитной совместимости (ЭМС), предназначенные для определения возможного взаимного влияния группы радиоэлектронных средств (РЭС) связи. Предложенные методики базируются на современных рекомендациях Международного союза электросвязи (МСЭ). Особенностью разработанных методик является их ориентация на практическую реализацию для получения комплексного решения задачи анализа электромагнитной совместимости средств связи. Также, особенностью методик является уменьшение сложности расчетов путем деления анализа на два этапа - предварительный и детальный. На предварительном этапе осуществляется выбор и анализ ЭМС РЭС по частотно-территориальному признаку. На этапе детального анализа проводятся расчеты ЭМС с учетом возможного влияния побочных и интермодуляционных Излучатели, а

также возможности блокировки приемников при расположении группы РЭС в ограниченном пространстве. Предложенные методики предусматривают уменьшение объема сложных расчетов для отдельных составляющих задач анализа ЭМС, требуют избыток точных исходных данных, при отсутствии части которых сложные расчеты по предложенным МСЭ методиками могут привести к неприемлемым результатам.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство, электромагнитная совместимость.

Ph.D. Kovalenko I.G., Mishchenko A.A., Vavasova O.S.

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TELECOMMUNICATION MEANS

The article proposed methodology for analyzing electromagnetic compatibility (EMC), which is designed to assess whether the mutual influence of radio electronic facilities (REF) connection. The proposed methods are based on the current recommendations of the International Telecommunication Union (ITU). The feature developed techniques is their focus on practical implementation for integrated analysis solution EMC communications. Also, the feature of the methods is to reduce the complexity of calculation analysis by division into two phases - preliminary and detailed. At the preliminary stage the selection and analysis of EMC for frequency-territorial basis. At the stage of detailed analysis calculations EMC considering the possible impact of adverse Radiators and intermodulation and blocking receivers at the location of the RECs in tight spaces. Proposed methods include reduction of complex calculations for individual components EMC analysis tasks that require excess accurate baseline data in the absence of complicated calculations on the proposed ITU techniques can lead to unacceptable results.

Keywords: radio electronic facilities electromagnetic compatibility.