

## МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЗАСОБІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ФІКСОВАНОЇ РАДІОСЛУЖБИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*В статті запропонована методика аналізу електромагнітної сумісності, що призначена для визначення можливого взаємного впливу групи радіоелектронних засобів зв'язку фіксованої радіослужби спеціального призначення.*

*Коваленко І.Г. Методика анализа электромагнитной совместимости средств радиосвязи фиксированной радиослужбы специального назначения. В статье предложена методика анализа электромагнитной совместимости, которая предназначена для определения возможного взаимного влияния группы радиоэлектронных средств связи фиксированной радиослужбы специального назначения.*

*I.Kovalenko Evaluation method of electromagnetic compatibility fixed telecommunication means of special purpose. The paper proposes a method for analyzing electromagnetic compatibility, which is designed to determine the possible mutual influence of the group of fixed radio communications means for special purpose.*

**Ключові слова:** радіоелектронний засіб, фіксована радіослужба, електромагнітна сумісність.

**Актуальність.** Розвиток технологій радіозв'язку та радіомовлення, збільшення обсягів інформації, підвищення швидкостей передачі приводить до підвищеного використання обмеженого радіочастотного ресурсу (РЧР). Це призводить до перевантаження радіочастотного спектру засобами рухомих та фіксованих служб, засобами цивільного та спеціального призначення. Тому постає актуальною задача забезпечення якісного функціонування цих засобів у спільних та суміжних діапазонах радіочастот [1].

Сучасний стан розвитку технологій радіозв'язку характеризується можливістю надання користувачам широкого спектру послуг, конвенгерцією цифрових технологій, розширенням смуг радіоканалів і, як наслідок, ускладненням функцій і умов роботи радіоелектронних засобів (РЕЗ) та появою між ними сукупності взаємодій з різноманітними зв'язками. У зв'язку з цим, виникає задача аналізу електромагнітної сумісності (ЕМС) РЕЗ не тільки в рамках окремих служб радіозв'язку, але й між групами радіозасобів на територіях, де розміщено велику кількість РЕЗ при їх одночасній роботі у спільних та суміжних смугах радіочастот [2]. Для вирішення задачі аналізу ЕМС в цих умовах постає актуальною задача розробки комплексних методів і методик для моделювання реальних процесів функціонування груп РЕЗ цивільного та спеціального призначення з метою відпрацювання методів та способів забезпечення їх спільної роботи та прогнозування електромагнітної обстановки (ЕМО), в першу чергу – фіксованої радіослужби, основу якої складають радіорелейні станції (РРС) радіорелейних ліній (РРЛ) прямої видимості [3 – 5].

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. Крім того розроблені методики не враховують особливості функціонування засобів зв'язку спеціального призначення, значна частина яких на даний час залишається аналоговими.

Тому постає актуальною задача розробки методики аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку спеціального призначення фіксованої радіослужби (далі – Методика) на основі рекомендацій МСЕ, яка дозволить розробити відповідні алгоритми та програмне забезпечення для вирішення задачі забезпечення виконання умов електромагнітної сумісності для РРС спеціального призначення.

**Задача дослідження** – розробка методики, призначеної для проведення практичних розрахунків параметрів та визначення умов електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів фіксованої служби спеціального призначення, що використовують радіорелейні лінії прямої видимості.

**Вихідні дані.** Перелік усіх технічних даних, які доцільно використовувати для розрахунку параметрів ЕМС РЕЗ надано в [6–8]. В запропонованій Методиці 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  $\eta$ ;
- 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).

#### Загальний опис методики

Методика передбачає використання моделі розрахунку, що містить парну і групову оцінку взаємного впливу РЕЗ в угрупованні, яка заснована на імовірностному (статистичному) підході до оцінки [1]. Проста логіка припускає, що кожен з пристроїв у групі можна розглядати як функціонально незалежний від інших засобів.

**1. Визначення критеріїв оцінки ЕМС РЕЗ.** Основним критерієм для визначення електромагнітної сумісності РЕЗ визначається *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 [9–13]:

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

де  $A(\Delta f)$  – захисне відношення при заданій частотній розлад  $\Delta f$  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):

$$P_c = \frac{P_{с\text{ прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}}^3 \eta_{\text{прд}}^3 \eta_{\text{прм}}}{16\rho^2 k_{\text{пол}}} \left[ \frac{\lambda}{R_c} \right]^2 V_c^2,$$

де  $P_c$  – потужність сигналу на вході приймача,  $P_{c\text{ прд}}$  – потужність передавача станції, що випромінює корисний сигнал;  $G_{\text{прд}}$  – коефіцієнт підсилення передавальної антени станції, що випромінює корисний сигнал;  $G_{\text{прм}}$  – коефіцієнт підсилення приймальної антени станції, яка зазнає впливу завад;  $\eta_{\text{прм}}$ ,  $\eta_{\text{прд}}$  – втрати у фідерах передавача станції, що випромінює корисний сигнал і приймача станції, яка зазнає впливу завад, відповідно;  $\lambda$  – довжина хвилі несучої;  $R_c$  – довжина траси розповсюдження;  $k_{\text{пол}}$  – коефіцієнт, який враховує поляризаційні втрати;  $V_c^2$  – множник ослаблення корисного сигналу, який дорівнює  $V_c^2 = V_{\text{см}}^2 y_c^2$ ,  $V_{\text{см}}^2$  – медіанне значення множника ослаблення;  $y_c^2$  – випадкова величина, що характеризує зміни в часі величини  $V_c^2$ .

З урахуванням сказаного вище, вираз для визначення потужності корисного сигналу можна представити у вигляді:

$$P_c = P_{\text{см}} y_c^2,$$

де  $P_{\text{см}}$  – медіанне значення потужності корисного сигналу.

Вираз для множника ослаблення завади має вигляд

$$V_3^2 = 10^{0,1(\tilde{V}_3^2 + \tilde{y}_3^2)},$$

де  $\tilde{V}_3^2$  – медіанне значення множника ослаблення сигналу, що заважає, дБ;  $\tilde{y}_3$  – випадкова величина, що характеризує зміни в часі величини множника ослаблення.

Аналогічно, вираз для потужності завади представляється у вигляді:

$$P_3 = P_{\text{зм}} \cdot 10^{0,1\tilde{y}_3^2},$$

де  $P_{\text{зм}}$  – медіанне значення потужності завади;

$$P_{\text{зм}} = \frac{P_{\text{з прд}} G_{\text{прд}} g_{\text{прд}}(\alpha_{\text{прд}})_{\text{з прд}} G_{\text{прм}} g_{\text{прм}}(\alpha_{\text{прм}})_{\text{з прм}} \left[ \frac{\lambda}{R_3} \right]^2 V_{\text{зм}}^2}{16p^2 k_{\text{пол}}}, \quad (2)$$

де  $P_{\text{з прд}}$  – потужність передавача станції, що заважає;  $G_{\text{прд}}$  – максимальний коефіцієнт підсилення передавальної антени станції, що заважає;  $g_{\text{прд}}(\alpha_{\text{прд}})$  – множник, що визначає підсилення передавальної антени станції, що заважає, у напрямку  $\alpha_{\text{прд}}$ ;  $G_{\text{прм}}$  – максимальний коефіцієнт підсилення приймальної антени станції, яка зазнає впливу завад;  $g_{\text{прм}}(\alpha_{\text{прм}})$  – множник, що визначає підсилення антени, що приймає корисний сигнал у напрямку  $\alpha_{\text{прд}}$ ,  $\alpha_{\text{прм}}$  – кути відхилення осей головних пелюсток діаграм спрямованості (ДС) передавальної антени станції, яка заважає, і приймальної антени, яка приймає корисний сигнал, по лінії, що з'єднує джерело завад і станцію, що приймає корисний сигнал;  $\eta_{\text{прд}}$  – втрати у фідері передавача станції, що заважає;  $R_3$  – довжина траси розповсюдження сигналу, що заважає;  $\eta_{\text{прм}}$  – втрати у фідері станції, яка приймає корисний сигнал.

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 [14]. В Рекомендації МСЭ-R P.530-12 [15] приведені наближені залежності відсотку часу перевищення глибини завмирань для найгіршого місяця року.

У випадку аналізу ЕМС аналогової РРЛ значення величин необхідного захисного відношення задаються у вихідних даних для двох фіксованих значень відсотка часу будь-якого місяця року. В залежності від типу сигналу, що передається, ці значення можуть змінюватись у незначних межах [16]. Величина параметру захисного відношення, що визначається як співвідношення між потужністю завад в основній смузі сигналу телефонного каналу і відношенням несуча/завада (коефіцієнт захисту від завад  $B$ , дБ), визначається [17]:

$$B = 10 \cdot \lg \frac{S/N_i}{C/I},$$

де  $S$  – потужність тестового сигналу в каналі тональної частоти (КТЧ), 1 мВт;  $N_i$  – незважена потужність завад в КТЧ (ширина смуги: 3,1 кГц);  $C$  – потужність несучої корисного сигналу (Вт);  $I$  – потужність несучої сигналу завади (Вт).

В загальному випадку 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 [18]:  $A(20\%, \Delta f) = 55 + N(\Delta f)$ , 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 [19]. Для більшості типів аналогових РРЛ при передачі багатоканальної телефонії необхідне захисне відношення для 20% складає 55 дБ, а для 0,001% відповідно 25 дБ [19]. 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 [19] 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 [19]:  $A(0,001\%, \Delta f) = 18 + N(\Delta f)$ , 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 [19].

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 [20] 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 [21].

## 2. Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження.

2.1. Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження в діапазонах 30-1000 МГц істотно залежить від конкретного профілю траси. Так, у випадку відкритої траси втрати ( $L_{\text{вт}}$ ) являють собою втрати вільного простору, що визначені відповідно до формули [22]:

$$L_{\text{вт}} = 32,5 + 20 \cdot \lg(f) + 20 \cdot \lg(d), \quad (3)$$

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

При закритій (чи напівзакритій) трасі в ряді випадків геометрію закриття 1-ї зони Френеля рельєфом місцевості можна охарактеризувати, відповідно до Рекомендації МСЕ-R P.526 [11], як:

- одна клиноподібна перешкода;
- екран кінцевої ширини;
- одиначна перешкода сферичної форми;
- дві ізольовані клиноподібні перешкоди.

На основі аналізу профілю траси розповсюдження встановлюється вид перешкод і у разі перелічених ідеалізованих ситуаціях дифракційні втрати розраховуються в аналітичному виді на основі загальної теорії дифракції відповідно Рекомендації МСЕ-R P.526 [11].

У всіх інших випадках, коли перешкод на трасі розповсюдження більш двох і їх не можна звести до однієї з перерахованих вище ідеалізованих перешкод, пропонується використовувати Рекомендацію МСЕ-R P.370 [10], яка на відміну більш сучасної Рекомендації МСЕ-R P.1546 не вимагає складних розрахунків з використанням надлишкових вихідних даних, відсутність або зниження точності яких може призвести до неприйнятних результатів. Рекомендація МСЕ-R P.370 містить криві розповсюдження радіохвиль, що базуються на численних експериментальних даних, а для визначення втрат на трасі розповсюдження пропонується здійснювати наступну послідовність операцій:

1) аналізується профіль траси і розраховуються:

ефективна висота антени, що передає;

параметр ступеня нерівності рельєфу  $\Delta h$  (див. Рекомендацію МСЕ-R P.310 [18]);

кут закриття місця для антени, що передає, та інші відповідні корегуючі фактори;

2) для визначених значень довжини траси, її типу, довжини хвилі, ефективної висоти антени, що передає, висоти приймальної антени величина втрат на трасі визначається за графіком;

3) за допомогою корегуючих факторів, які визначені в пункті 1), проводиться уточнення величини втрат.

Після цих операцій, у випадку змішаної траси, проводиться інтерполяція між величинами втрат, отриманими для різних типів трас.

Якщо в результаті отримується значення нижче, ніж отримане за допомогою (3), послаблення радіосигналу за рахунок визначається відповідним формулі для відкритої траси (3).

2.2 Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження в діапазонах вище 1000 МГц пропонується проводити відповідно Рекомендації МСЕ-R P.452 [12], у якій містяться рекомендації щодо урахування наступних механізмів розповсюдження радіохвиль:

розповсюдження у вільному просторі;

дифракція;

тропосферне розсіювання;

аномальне розповсюдження радіохвиль (тобто рефракція і хвилеводне розповсюдження), а також втрати за рахунок забудови (там, де це необхідно).

В залежності від кліматичних особливостей, довжини хвилі, відсотка часу, розмірів і профілю траси розповсюдження буде домінувати той чи інший механізм. Для кожної конкретної траси розповсюдження, насамперед, проводиться аналіз профілю траси і визначається її тип. В залежності від типу траси (відкрита, закрита чи напівзакрита), вибір механізмів розповсюдження радіохвиль (РРХ) і розрахунки величини втрат здійснюються відповідно таблиці 1.

Таблиця 1

Тип траси	Механізми РРХ, які треба врахувати	Розрахункова формула для множника послаблення
<b>Відкрита</b>	Розповсюдження у вільному просторі, втрати за рахунок забудови.	$L(p) = L_{\text{вп}}(p) + A_{ht} + A_{hr}$ , [дБ], де $L(p)$ – втрати на трасі розповсюдження, які не перевищуються в $p$ відсотку часу; $L_{\text{вп}}(p)$ – втрати в вільному просторі (МСЕ-R P.525); $A_{ht}, A_{hr}$ – додаткові втрати за рахунок локальної забудови.
<b>Напівзакрита</b>	Розповсюдження в вільному просторі, дифракція, втрати за рахунок забудови.	$L(p) = L_{\text{вп}}(p) + L_d(p) + A_{ht} + A_{hr}$ , [дБ], де $L_d(p)$ – дифракційні втрати (МСЕ-R P.526).
<b>Закрита</b>	Дифракція, тропосферне розсіювання, аномальне розповсюдження, втрати за рахунок забудови.	$L(p) = -5 \lg(10^{-0,2 L_{\text{тр}}} + 10^{-0,2 L_d} + 10^{-0,2 L_a}) + A_{ht} + A_{hr}$ , [дБ], де $L_{\text{тр}}, L_d$ и $L_a$ – втрати за рахунок тропосферного розсіювання, дифракційні втрати та втрати за рахунок аномального розповсюдження (МСЕ-R P.452, P.526).

Формули розрахунків за переліченими вище рекомендаціями МСЕ значно спрощуються, якщо врахувати, що в даній методиці 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 можна знехтувати, так як вони становляться сумірними з втратами за рахунок тропосферного розсіювання та дифракції на трасах протяжністю більше 250-300 км (тобто член виду  $10^{-0,2 L_a} = 0$  дБ) [12].

**3. Урахування характеристик та спрямованості антен при розрахунку параметрів ЕМС РЕЗ.** 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.

Для діапазонів частот нижче 1 ГГц використовується досить велика кількість різних типів антен. Однак Рекомендацій МСЕ щодо апроксимації статистично усереднених ДС антен у цьому діапазоні не існує. Тому пропонується використовувати теоретичні вираження для ДС антен, які найбільш часто використовуються [24]:

несиметричного вібратора (штиря);

симетричного вібратора без рефлектора і з рефлектором (диполя, кутової антени);

турнікетної, панельної, спіральної антен і антени типу хвильовий канал.

Для розрахунку ДС антен в діапазонах частот вище 1 ГГц для апроксимації усереднених ДС пропонується використовувати Рекомендацію F.1245 [25] для антен РРЛ прямої видимості (параболічні і рупорно-параболічні антени) для випадку розрахунку завад при визначенні умов ЕМС РЕЗ та при координації РЕЗ різних служб в суміщених смугах частот. Відповідно до Рекомендації F.1245 у випадку, коли відношення діаметра параболічної чи рупорно-параболічної антени до довжини хвилі перевищує 100 ( $D/\lambda > 100$ ), коефіцієнт підсилення визначається наступними формулами [25]:

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} (D\varphi/\lambda)^2, & \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m, \\ G(\varphi) &= G_1, & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \max(\varphi_m, \varphi_r), \\ G(\varphi) &= 29 - 25 \lg \varphi, & \text{при } \max(\varphi_m, \varphi_r) \leq \varphi < 48^\circ, \\ G(\varphi) &= -13, & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{aligned}$$

де  $G_{\max}$  – коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропного випромінювача (дБ);  $\varphi$  – кут відхилення від напрямку максимального випромінювання (градуси);  $G_1 = 2 + 15 \lg(D/\lambda)$  – значення коефіцієнта підсилення в напрямку першого бокового пелюстка;

$$\begin{aligned} \varphi_m &= (20 \lambda / D) \sqrt{G_{\max} - G_1}, \\ \varphi_r &= 12,02 (D/\lambda)^{-0,6}. \end{aligned}$$

Якщо ж відношення діаметра до довжини хвилі менше або дорівнює 100 ( $D/\lambda \leq 100$ ), то вираження для опису ДС мають вигляд:

$$\begin{aligned} G(\varphi) &= G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} (D\varphi/\lambda)^2, & \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m, \\ G(\varphi) &= 39 - 5 \lg(D/\lambda) - 25 \lg \varphi, & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 48^\circ, \\ G(\varphi) &= 3 - 5 \lg(D/\lambda), & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ, \\ G(\varphi) &= 52 - 10 \lg(D/\lambda) - 25 \lg \varphi, & \text{при } (100\lambda/D) \leq \varphi < 48^\circ, \\ G(\varphi) &= 10 - 10 \lg(D/\lambda), & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{aligned}$$

#### Етапи методики.

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.1).

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

2. Визначається рівень корисного сигналу за формулою (2). 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 (формула (1)) 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. Несприятливі 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.

**Висновок.** Запропонована методика базується на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку. Особливістю методики є її орієнтація на практичну реалізацію для отримання комплексного рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку спеціального призначення. Методика передбачає 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. Крім того розроблена методика враховує особливості функціонування засобів зв'язку спеціального призначення, значна частина яких на даний час залишається аналоговими.

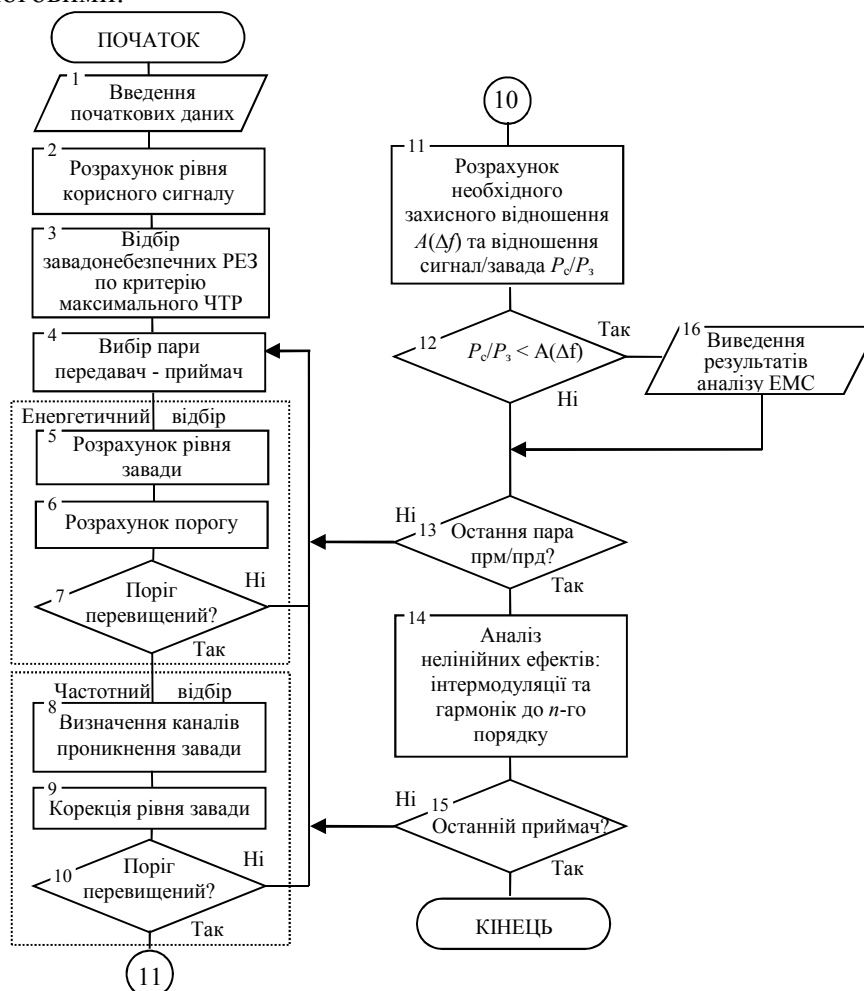


Рис. 1. – Загальний алгоритм аналізу EMC РЕЗ фіксованої радіослужби

На основі запропонованої методики були розроблені алгоритми та спеціальне програмне забезпечення (ПЗ) аналізу EMC РЕЗ, яке успішно використовується спеціальними користувачами РЧР України [26]. Розроблене ПЗ дозволило підвищити ефективність виконання задач аналізу EMC засобів радіорелейного зв'язку спеціального призначення. Відповідність реалізації методик умовам реального розповсюдження радіохвиль підтверджується результатами практичного застосування розробленого ПЗ. 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. Регламент радиосвязи. Международный союз электросвязи. – Женева, 2012.
4. Системи передавання радіорелейні прямої видимості. Терміни та визначення. ДСТУ 3936–99. – Київ. Держстандарт України. 1999. – 20 с.



5. Радиозв'язок радіорелейний. Терміни та визначення. ДСТУ 3610 – 97. – Київ. Держстандарт України. 1997. – 12 с.
6. Системи передавання радіорелейні прямої видимості. Класифікація. Основні параметри. Методи вимірювань. ДСТУ 3937–1999. – Київ. Держстандарт України. 2000.
7. Рекомендация МСЭ-R F.758. Принципы разработки критериев совместного использования частот наземной фиксированной службой и другими службами.
8. Handbook of Spectrum Management and Computer aided Technique, 2005, Revised 2005, Geneva.
9. Методы расчета помех в наземных радиорелейных системах и системах фиксированной спутниковой службы. Отчет 388-5 МККР (Вопросы 32/4 и 23/9, Исследовательская программа 23А/9). –XVI Пленарная Ассамблея, Дубровник, 1986.
10. Рекомендация МСЭ-R P.370-7 (1995). VHF FND UHF PROPAGATION CURVES FOR THE FREQUENCY RANGE FROM 30 MHz TO 1000 MHz.
11. Рекомендация МСЭ-R P.526-10 (2007). Распространение волн за счет дифракции.
12. 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.
13. Рекомендация МСЭ-R P.341-5 (1999). Концепция потерь передачи для радиолиний.
14. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем прямой видимости. Отчет МККР 338-6. Женева: – 1990.
15. Рекомендация МСЭ-R P.530-12 (2007). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования наземных систем, работающих в пределах прямой видимости.
16. Рекомендация МСЭ-F.555. Допустимые шумы в гипотетической эталонной цепи телевизионной радиорелейной системы.
17. Рекомендация МСЭ-P SF.766. Методика определения влияния помех на качество и готовность наземных радиорелейных систем и систем фиксированной спутниковой службы.
18. Рекомендация МСЭ-T J. 11 (ex. CMTT 502). HYPOTHETICAL REFERENCE CIRCUITS FOR SOUND PROGRAMME TRANSMISSIONS. Terrestrial systems and systems in the fixed satellite service.
19. Промежуточный отчет о НИР „Радиочастотное обеспечение создания системы спутниковой связи Украины”, НПВФ „Банкомсвязь”, Киев, 1994.
20. 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.
21. 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.
22. Рекомендация МСЭ-R P.525-2 (1994). Расчет ослабления в свободном пространстве.
23. Рекомендация МСЭ-R P.310-9 (1994). DEFINITIONS OF TERMS RELATING TO PROPAGATION IN NON-IONIZED MEDIA.
24. Антенно-фидерные устройства. Дробкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. – М.: Советское радио, 1974.
25. Рекомендация МСЭ-P F.1245-2 (2012). MATHEMATICAL MODEL OF AVERAGE RADIATION PATTERNS FOR LINE-OF-SIGHT POINT-TO-POINT RADIO RELAY SYSTEM ANTENNAS FOR USE IN CERTAIN COORDINATION STUDIES AND INTERFERENCE ASSESSEMENT IN THE FREQUENCE RANGE FROM 1 TO ABOUT 40 GHz.
26. Максименко Ю.Л., Лягоскін О.В., Коваленко І.Г. „Програмний комплекс аналізу електромагнітної сумісності засобів фіксованого зв'язку та базового обладнання системи DCS-1800 с груповим використанням частот” матеріали 15-ї Міжнародної конференції „СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології” 2004 р., с 265 – 266.