

## ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Розвиток рідіотехнологій, збільшення обсягів інформації, підвищення швидкостей передачі призводить до підвищеного використання обмеженого радіочастотного ресурсу, перевантаження радіочастотного спектру засобами рухомих та фіксованих радіослужб. Тому виникає задача забезпечення якісного функціонування цих засобів у спільних та суміжних діапазонах радіочастот. Для вирішення задачі аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів в цих умовах необхідна розробка програмного забезпечення для моделювання реальних процесів їх функціонування з метою відпрацювання методів та способів забезпечення спільної роботи та прогнозування електромагнітної обстановки. Існуючі методики та алгоритми, запропоновані Міжнародним союзом електрозв'язку, не дають комплексного загального рішення задач даного класу. В статті запропонована загальна методика та алгоритм розрахунку електромагнітної сумісності, що призначені для визначення можливого взаємного впливу радіоелектронних засобів зв'язку в дуельному варіанті. Запропонована методика дозволяє узагальнити задачу розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів і на її основі розробляти автоматизовану систему розрахунків для множини типів засобів радіозв'язку різних радіослужб. Її особливістю є розрахунок електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів по енергетичному критерію, який виражається відношенням сигнал/(шум+завада) при заданих показниках якості, що представляється у вигляді коефіцієнтів ослаблення радіосигналів (коефіцієнтів втрат). При відсутності даних про рівень корисного сигналу розрахунок проводиться на основі характеристик чутливості приймача.

Запропонована методика базується на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку, її особливістю є орієнтація на практичну реалізацію для отримання комплексного загального рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку, яке може бути основою для розрахунків електромагнітної сумісності різних радіозасобів різних радіослужб. На основі запропонованих методик проводиться розробка алгоритмів та спеціального програмного забезпечення аналізу електромагнітної сумісності для подальшого використання спеціальними користувачами радіочастотного ресурсу України.

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

### **И.Г.Коваленко. Общая методика и алгоритм расчета электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.**

Развитие ридиотехнологий, увеличение объемов информации, повышение скоростей передачи приводит к повышенному использованию ограниченного радиочастотного ресурса, перегрузки радиочастотного спектра средствами подвижных и фиксированных радиослужб. Поэтому возникает задача обеспечения качественного функционирования этих средств в общих и смежных диапазонах радиочастот. Для решения задачи анализа электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в этих условиях необходима разработка программного обеспечения для моделирования реальных процессов их функционирования с целью отработки методов и способов обеспечения совместной работы и прогнозирования электромагнитной обстановки. Существующие методики и алгоритмы, предложенные Международным союзом электросвязи, в не дают комплексного общего решения задач данного класса. В статье предложена общая методика и алгоритм расчета электромагнитной совместимости, предназначенные для определения возможного взаимного влияния радиоэлектронных средств связи в дуельном варианте. Предложенная методика позволяет обобщить задачу расчета электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и на ее основе разрабатывать автоматизированную систему расчетов для разных типов средств радиосвязи различных радиослужб. Ее особенностью является расчет электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств по энергетическому критерию, который выражается отношением сигнал / (шум + помеха) при заданных показателях качества, которое представляется в виде коэффициентов ослабления радиосигналов (коэффициентов потерь). При отсутствии данных об уровне полезного сигнала расчет производится на основе характеристик чувствительности приемника.

Предложенная методика базируется на современных рекомендациях Международного союза электросвязи, ее особенностью является ориентация на практическую реализацию для получения комплексного общего решения задачи анализа электромагнитной совместимости средств связи, которое может быть основой для расчетов электромагнитной совместимости различных радиосредств различных радиослужб. На основе предложенных методик проводится разработка алгоритмов и специального программного обеспечения анализа электромагнитной совместимости для дальнейшего использования специальными пользователями радиочастотного ресурса Украины.

**Ключевые слова:** радиоэлектронное средство, электромагнитная совместимость.

**I. Kovalenko. General methodology and algorithm for calculating the electromagnetic compatibility of radioelectronic devices.**

The development of radio technology, an increase in the volume of information, and an increase in transmission rates leads to increased use of a limited radio frequency resource, overloading the radio frequency spectrum by means of mobile and fixed radio services. Therefore, the problem arises of ensuring the quality functioning of these tools in the general and adjacent ranges of radio frequencies. To solve the problem of analyzing the electromagnetic compatibility of electronic equipment in these conditions, it is necessary to develop software for modeling the real processes of their functioning in order to develop methods and methods for ensuring joint work and predicting the electromagnetic environment. Existing methods and algorithms proposed by the International Telecommunication Union do not provide a comprehensive solution to the problems of this class. The article proposes a general methodology and algorithm for calculating electromagnetic compatibility, designed to determine the possible mutual influence of electronic communications in a dueling version. The proposed methodology allows us to generalize the task of calculating the electromagnetic compatibility of radioelectronic devices and, on its basis, to develop an automated calculation system for different types of radio communication equipment of various radio services. Its peculiarity is the calculation of the electromagnetic compatibility of electronic equipment according to the energy criterion, which is expressed by the signal / (noise + interference) ratio for given quality indicators, which is presented in the form of attenuation coefficients of radio signals (loss factors). In the absence of data on the level of the useful signal, the calculation is based on the characteristics of the sensitivity of the receiver.

The proposed methodology is based on modern recommendations of the International Telecommunication Union, its feature is orientation towards practical implementation to obtain a comprehensive general solution to the problem of analyzing the electromagnetic compatibility of communications, which can be the basis for calculating the electromagnetic compatibility of various radio facilities of various radio services. Based on the proposed methods, algorithms and special software for electromagnetic compatibility analysis are developed for further use by special users of the radio frequency resource of Ukraine.

**Keywords:** electronic device, electromagnetic compatibility

**Постановка задачі.** Розвиток радіотехнологій, збільшення обсягів інформації, підвищення швидкостей передачі призводить до підвищеного використання обмеженого радіочастотного ресурсу (РЧР), перевантаження радіочастотного спектру засобами рухомих та фіксованих служб. Тому виникає задача забезпечення якісного функціонування цих засобів у спільних та суміжних діапазонах радіочастот.

Для вирішення задачі аналізу ЕМС в цих умовах необхідна розробка програмного забезпечення для моделювання реальних процесів функціонування груп РЕЗ метою відпрацювання методів та способів забезпечення їх спільної роботи та прогнозування електромагнітної обстановки (ЕМО). Запропоновані підходи для вирішення задач даного класу не дають комплексного рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, 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 МСЄ методиками можуть привести до неприйнятних результатів. Крім того, для різних радіослужб використовуються різні підходи, зокрема з розрахунку параметрів радіосигналів та критеріїв ЕМС. Тому для загального вирішення задач даного класу пропонується використання програмного модулю розрахунку (визначення) електромагнітної сумісності РЕЗ по енергетичному критерію, який виражається відношенням сигнал/(шум+завада) при заданих показниках якості, що представляється у вигляді коефіцієнтів ослаблення радіозавад (коефіцієнта втрат). Тому постає актуальною задача – розробка загальної методики та алгоритму розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів для створення відповідного програмного забезпечення.

**Аналіз останніх публікацій.** В множині рекомендацій Міжнародного союзу електрозв'язку [1 – 3] викладені методики розрахунку окремих складових показників електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів. При чому для різних засобів зв'язку, випромінювальних засобів різних радіослужб застосовуються окремі підходи, зокрема методики розрахунку послаблення радіосигналів та критеріїв електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів. Для окремих радіослужб були розроблені методики розрахунку ЕМС [4 – 7], на основі яких були розроблені відповідні окремі програмні засоби розрахунку.

Для розробки єдиного програмного засобу розрахунку необхідна розробка загальної методики та алгоритму розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, яка може бути використана для різних радіозасобів різних радіослужб.

#### Виклад основного матеріалу.

**1. 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 [1-3]:

$$\frac{P_c}{P_z + P_{\text{ш}}} = A \Delta f ,$$

де  $A(\Delta f)$  – захисне відношення при заданій частотній розклад  $\Delta f$  між корисним сигналом і завадою для визначеного відсотку часу;  $P_c$  – потужність корисного сигналу на вході приймача, який зазнає впливу завад,  $P_z$  – потужність завадового сигналу на вході приймача,  $P_{\text{ш}}$  – потужність шумів приймача.

Відповідно **умовою забезпечення функціонування радіолінії** є:

$$\frac{P_c}{P_z + P_{\text{ш}}} > A \Delta f .$$

**Рівень шумів приймача** (чутливість приймача) визначається наступним чином:

$$P_{\text{ш}} = k_B T_0 B_{\text{ш}} \left( \frac{T_a}{T_0} + N_{\text{ш}} - 1 \right),$$

де  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – стала Больцмана, Дж/К;  $T_0$  – абсолютна температура навколишнього середовища, К;  $T_a$  – ефективна шумова температура антени, К;  $B_{\text{ш}}$  – ширина ефективної смуги шумів приймача, Гц;  $N_{\text{ш}}$  – коефіцієнт шуму приймача.

У діапазоні 30...120 МГц при кімнатній температурі ( $T_0 = 293$  К) відношення  $T_a/T_0 = 1,8 \cdot 10^6/f^3$ , де  $f$  – відповідна частота, МГц. На вищих частотах відношення  $T_a/T_0 \approx 1$ . Тому потужність шуму буде дорівнювати:

$$P_{\text{ш}} = k_B T_0 B_{\text{ш}} N_{\text{ш}} .$$

На значення **захисного відношення**  $A(\Delta f)$  впливає багато чинників, зокрема частотне рознесення між носійними КС і ЗС, вид і глибина їхньої модуляції, спосіб обробки сигналу й метод його кодування, характеристики приймача (його чутливість, вибірковість) тощо.

Критерії ЕМС окремих радіослужб (захисні відношення  $A(\Delta f)$ ) розробляє Міжнародний союз електрозв'язку і вони знаходять відображення у відповідних звітах і рекомендаціях. До таких Рекомендацій зокрема належать Рекомендації ІТУ-R [1-7]:

- 64 – Про потрібні захисні відношення та мінімальні напруженості поля;
- F.240 – Різні захисні відношення, зокрема загасання;
- BS.412 – Захисні відношення для звуку з ЧМ у діапазоні ДВЧ;
- BS.560 – Захисні відношення для звуку в діапазонах НЧ, СЧ, ВЧ;
- BT.565 – Захисні відношення для 625-рядкових ТБ систем від РЧ у смузі 582...606 МГц;
- F.566 – Визначення захисних відношень для радіомовлення;
- F.589 – Захисні відношення для радіонавігації;
- VO.600 – Стандартна група умов тестування та вимірювальних процедур для суб'єктивного і об'єктивного визначення захисних відношень для
  - M.631 – Фазовані захисні відношення для радіонавігації;
  - F.638 – Захисні відношення щодо РЧ/ЗЧ для звуку;
  - F.641 – Захисні відношення для звуку з ЧМ;
  - BT.655 – Захисні відношення для ТБ із АМ;
- 669 – Захисні відношення при дослідженнях спільного використання спектра;
- S.671 – Необхідні захисні відношення для вузькосмугових систем передавання «один канал на носійну» (ОКН) від завад із боку аналогових телевізійних сигналів;

S.792 – Захисні відношення щодо завад для радіомовної (телевізійної) супутникової служби в діапазоні частот 12 ГГц;

1044 – Критерії спільного використання частот у радіоаматорській та радіоаматорській супутниковій службах;

S.1063 – Критерії суміщення між фідерними лініями РМСС та іншими лініями Земля–космос або космос–Земля ФСС;

S.1150 – Технічні критерії для використання під час експертизи ймовірності шкідливих завад між частотними присвоєннями у фіксованій супутниковій службі;

M.1183 – Припустимі рівні завад у цифровому каналі геостационарної мережі рухомої супутникової служби в діапазоні 1...3 ГГц, викликаних іншими мережами цієї служби та фіксованою супутниковою службою;

M.1231 – Завадові критерії для ліній космос–Земля, використовуваних супутниковою службою з негеостационарними супутниками в діапазоні 137...138 МГц;

M.1232 – Критерії спільного використання смуги 137...138 МГц лініями космос–Земля рухомої супутникової служби із супутниками на негеостационарних орбітах;

M.1234 – Припустимі рівні завад у цифровому каналі геостационарної супутникової мережі повітряної рухомої супутникової (R) служби (ПРС(R)C) у діапазонах від 1545 до 1555 МГц і від 1646,5 до 1656,5 МГц і відповідних фідерних лініях, викликані іншими мережами цієї служби та фіксованою супутниковою службою;

SF.1271 – Ефективне використання спектра із застосуванням імовірнісних методів;

ВО.1293 – Захисні маски та відповідні методи розрахунків завад радіомовним супутниковим системам, що використовують випромінювання в цифровому режимі;

ВО.1297 – Захисні відношення для використання з метою планування при перегляді Планів;

SF.1320 – Максимально припустимі значення густини потоку потужності на поверхні Землі, створюваного негеостационарними супутниками фіксованої супутникової служби, які використовуються у фідерних лініях

**Рівень сигналів** (як корисного, так і завадового) в радіолінії можна виразити наступним чином [3]:

$$P_c = P_{\text{прд}} + G_{\text{Апрм}} + G_{\text{Апрд}} - \eta_{\text{Ф1}} - \eta_{\text{Ф2}} - L_{\text{пол}} - L_{\text{bf}} - L_{\text{доп}} \text{ дБм},$$

де  $G_{\text{Апрм}}, G_{\text{Апрд}}$  – коефіцієнти підсилення антен приймача та передавача в напрямку розповсюдження (дБі);  $\eta_{\text{Ф1}}, \eta_{\text{Ф2}}$ , - втрати у фідерах (дБ);  $L_{\text{пол}}$  - втрати за рахунок поляризації (дБ);  $L_{\text{bf}}$  – послаблення сигналу у вільному просторі (дБ);  $L_{\text{доп}}$  – додаткове послаблення на трасі розповсюдження радіохвиль (дБ).

Відповідно рекомендації Міжнародного союзу електрозв'язку МСЕ-R P.535 для лінії зв'язку пункту з пунктом **послаблення у вільному просторі** між ізотропними антенами розраховується:

$$L_{\text{bf}} = 20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ дБ},$$

де  $L_{\text{bf}}$  – послаблення у вільному просторі (дБ),  $d$  – відстань (м),  $\lambda$  – довжина хвилі (м).

Використовуючи частоту замість довжини хвилі можна записати:

$$L_{\text{bf}} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \text{ дБ},$$

де  $f$  – частота (МГц),  $d$  – відстань (км).

Радіолокаційні системи представляють собою особливий випадок, в них послаблення сигналу здійснюється як від передавача до цілі, так і в зворотному напрямку, тому для них [3]:

$$L_{\text{bf}} = 103,4 + 20 \log f + 20 \log d - 10 \log \sigma \text{ дБ},$$

де  $\sigma$  – поперечний переріз радіолокаційної цілі (м<sup>2</sup>).

Поперечний переріз об'єкта (радіолокаційної цілі) є відношення загальної ізотропної еквівалентної потужності, що розсіюється, до щільності потоку потужності, що попадає на ціль.

**Додаткове послаблення на трасі розповсюдження радіохвиль**  $L_{\text{доп}}$  залежить від багатьох чинників (частота, рельєф та покриття місцевості, кліматичних умов, забудови місцевості тощо) в залежності від діапазону частот та радіотехнологій розраховується відповідно множині розроблених рекомендацій Міжнародного союзу електров'язку, а саме [1 – 7]:

Рек. МСЭ-R P.368 Криві поширення земної хвилі для частот між 10 кГц і 30 МГц;

Рек. МСЭ-R P.452 Процедура прогнозування для оцінки перешкод між станціями, що перебувають на поверхні Землі, на частотах вище приблизно 0,1 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.528 Криві поширення радіохвиль для повітряної рухливий і радіонавігаційної служб, що працюють у діапазонах ОВЧ, УВЧ і СВЧ;

Рек. МСЭ-R P.530 Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування, що вимагаються для проектування наземних систем прямої видимості;

Рек. МСЭ-R P.533 Метод для прогнозування робочих характеристик Вч- Ліній;

Рек. МСЭ-R P.534 Метод розрахунків напруженості поля при поширенні за допомогою спорадичного шару E;

Рек. МСЭ-R P.617 Методи прогнозування та дані про поширення радіохвиль, необхідні для проектування тропосферних радіорелейних систем;

Рек. МСЭ-R P.618 Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування, необхідні для проектування систем зв'язки Земля- Космос;

Рек. МСЭ-R P.620 Дані про поширення радіохвиль, що вимагаються для оцінки координатних відстаней у діапазоні частот від 100 МГц до 105 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.678 Оцінка мінливості явищ поширення радіохвиль і оцінка ризику, пов'язаного із запасом на поширення;

Рек. МСЭ-R P.679 Дані про поширення радіохвиль, необхідні для проектування супутникових радіомовних систем;

Рек. МСЭ-R P.680 Propagation data required for the design of earth-space maritime mobile tele- communication systems;

Рек. МСЭ-R P.681 Дані про поширення радіохвиль, необхідні для проектування сухопутних рухливих систем зв'язки Земля- Космос;

Рек. МСЭ-R P.682 Дані про поширення радіохвиль, необхідні для проектування повітряних рухливих систем зв'язки Земля- Космос;

Рек. МСЭ-R P.684 Прогнозування напруженості поля на частотах нижче приблизно 150 кГц;

Рек. МСЭ-R P.843 Communication by meteor-burst propagation;

Рек. МСЭ-R P.1147 Прогнозування напруженості поля просторової хвилі на частотах між приблизно 150 і 1700 кГц;

Рек. МСЭ-R P.1238 Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування для планування систем радіозв'язку усередині приміщень і локальних зонових радіомереж у частотному діапазоні 300 МГц - 100 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.1410 Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування, що вимагаються для проектування наземних широкосмугових систем радіодоступа, що працюють у діапазоні частот від 3 до 60 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.1411 Дані про поширення радіохвиль і методи прогнозування для планування зовнішніх систем радіозв'язку малого радіуса дії й локальних радіомереж у діапазоні частот від 300 МГц до 100 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.1546 Метод прогнозування для трас зв'язку "пункту із зоною" для наземних служб у діапазоні частот від 30 МГц до 3000 МГц;

Рек. МСЭ-R P.1622 Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 Thz and 375 Thz;

Рек. МСЭ-R P.1623 Метод прогнозування динаміки завмирання сигналу на трасах Земля- Космос;

Рек. МСЭ-R P.1812 Метод прогнозування поширення сигналу на конкретній трасі для наземних служб „з пункту в зону” у діапазонах УВЧ і ОВЧ;

Рек. МСЭ-R P.1814 Методи прогнозування, необхідні для розробки наземних оптичних ліній для зв'язку у вільному просторі;

Рек. МСЭ-R P.1853 Синтез тимчасових рядів тропосферного ослаблення;

Рек. МСЭ-R P.2001 Універсальна модель наземного поширення радіохвиль для широкого застосування в смузі частот 30 МГц - 50 ГГц;

Рек. МСЭ-R P.2041 Прогнозування загасання на трасі на лініях між повітряною платформою й космосом і між повітряною платформою й поверхнею Землі.

## 2. Розрахунок послаблень радіосигналів за рахунок розповсюдження.

### 2.1 Аналіз поширення радіохвиль у діапазоні частот 10 кГц...30 МГц

На частотах, нижчих за 30 кГц, втрати при поширенні радіосигналів наближаються до рівня втрат при поширенні у вільному просторі. На ДНЧ проходження радіохвиль у режимі хвилевідного поширення між іоносферою та поверхнею Землі може спостерігатися у глобальному вимірі.

У цьому діапазоні частот важливо враховувати два різні режими поширення: режим земної хвилі, що часто визначає рівні корисного сигналу (КС), та режим іоносферної хвилі, за допомогою якого часто поширюються завадові сигнали (ЗС). Амплітуда відбитого від іоносфери сигналу характеризується виразними добовими коливаннями, спричиненими змінами рівня поглинання в іоносфері. Природа іоносферного поширення передбачає, що лінії зв'язку великої довжини зазнаватимуть спотворень, зумовлених багатопроменевістю, завадами, які впливають на сигнал, та перервами в роботі.

У рамках моделей поширення на ВЧ застосовують числові карти іоносферних характеристик, а в Рекомендації Р.533 МСЕ-Р викладено метод прогнозування для будь-якої траси, будь-якої пори року та якої завгодно кількості сонячних плям основної і робочої завадової проміжної частоти (ЗПЧ), довільного рівня напруженості поля, рівня приймальної потужності та відношення С/Ш. Питання поширення земних хвиль для частот від 10 кГц до 30 МГц розглядаються в Рекомендації Р.368 МСЕ-Р. Через складність розрахунків у Рекомендації Р.368 використовується сім'я кривих напруженості поля  $E$  при поширенні земної хвилі для низки типових значень частот та характеристик поверхні Землі ( $\epsilon$  – відносної діелектричної проникності,  $\sigma$  – провідності) при ЕВП передавальної станції, що дорівнює 1 кВт (рис. 1.2).

Основні втрати передавання, дБ, можна знайти з такого рівняння:

$$L_b = 142,0 + 201gf - E, \quad (4)$$

скориставшись значеннями напруженості поля  $E$ , дБмкВ, згідно з кривими, викладеними в Рекомендації Р.368 ( $Y(4) f$  подається в мегагерцах, а  $E$  – у децибелах). Вплив навколишнього середовища на передавальну та приймальну антени розглянуто в Рекомендації Р.341 МСЕ-Р.

### 2.2 Аналіз поширення радіохвиль у діапазоні частот 30 МГц...3 ГГц.

У діапазоні частот 30 МГц...3 ГГц, за винятком найнижчої межі смуги, поширення радіохвиль через регулярну іоносферу не відбувається. Вплив погоди обмежується явищами надрефракції та хвилевідного поширення, які можуть спричинюватися інверсіями нормального градієнта індексу рефракції в атмосфері. Іншими істотними відхиленнями від поширення у вільному просторі є тропосферне розсіювання та дифракція, що викликаються впливом перешкод на трасі поширення, зокрема й опуклістю Землі, й дифракцією на рельєфі місцевості та будівлях. Залежно від конкретних умов поширення радіохвиль для оцінювання втрат при поширенні можуть використовуватися такі дані.

**Послаблення радіохвиль у вільному просторі.** За певних умов достатньо припустити, що корисний сигнал послаблюється лише через поширення у вільному просторі (Рекомендація Р.525 МСЕ-Р).

**Дифракція навколо гладкої поверхні Землі.** Для прогнозування рівня корисного сигналу на відстанях, що перевищують відстань прямої видимості, необхідно враховувати кривину Землі (Рекомендація Р.526 МСЕ-Р).

Поширення радіохвиль у конкретних регіонах світу або над земною поверхнею з певним ступенем нерівності. У Рекомендаціях ІТУ-Р Р.1546-2, Р.528, МСЕ-Р наведено криві для різних радіослужб, діапазонів частот, регіонів світу та висот антен, що можуть застосовуватися для конкретної розглядуваної ситуації.

**Поширення радіохвиль у міській місцевості.** Ця модель ґрунтується частково на Рекомендації Р.529 МСЕ-Р і використовує формулу Окамура-Хата для розрахунку послаблення залежно від відстані та еквівалентної висоти передавальної антени, частки (у відсотках) забудованої території навколо місця приймання, типу траси та ступеня нерівності земної поверхні. Окрім того, може знадобитися врахування інших механізмів поширення, що можуть призвести до виникнення завад. Ці механізми включають у себе такі явища.

**Іоносферне поширення.** У певні пори року та час доби режими іоносферного поширення, такі як поширення через спорадичний шар  $E$ , можуть забезпечувати поширення радіохвиль на великі відстані на частотах близько 70 МГц. Ці питання розглянуто в Рекомендації Р.534 МСЕ-Р.

**Хвилевідне поширення та надрефракція.** Ці явища розглядаються в Рекомендаціях Р.834 та Р.452 МСЕ-Р.

У Рекомендації ІТУ-Р Р.1546 використовується метод розрахунку для радіослужб мовлення на основі експериментальних кривих поширення, що подають значення напруженості поля у смугах ДВЧ (30... 250 МГц) та НВЧ (250 МГц...1ГГц) як функції протяжності траси для різних ефективних висот передавальної антени на наземних і морських трасах та для 1-50% часу. Усі криві відповідають висоті приймальної антени  $h_2 = 10$  м, а криві для наземних трас відповідають нерівності місцевості  $\Delta h = 50$  м, що зазвичай застосовується в розрахунках для умов типової нерівної місцевості. Ефективну висоту антени необхідно визначати згідно з Рекомендацією Р.341. Для ефективних висот  $h_1$  передавальної антени, більших за 1200 м та менших за 37,5 м, у Рекомендації ІТУ-Р Р.1546 наведено метод і відповідні формули для розрахунку напруженості поля.

**2.3 Аналіз поширення радіохвиль у діапазоні частот 3...20 ГГц.** Описані раніше чинники поширення радіохвиль (за винятком іоносферних хвиль) діють також і в цьому діапазоні частот. Однак тут доводиться враховувати явища послаблення, розсіювання та крос-поляризації, що виникають під впливом гідрометеорів та інших атмосферних частинок. На частотах, вищих приблизно за 15 ГГц, необхідно також враховувати послаблення в атмосферних газах. Дощі, які випадають на трасі поширення радіохвиль, можуть створювати чимало проблем. На частотах, вищих приблизно за 10 ГГц, послаблення в дощових краплях може призвести до суттєвого погіршення якості сигналу. Методи оцінювання ймовірностей рівнів послаблення зазвичай ґрунтуються на значеннях інтенсивності дощів  $R_0$ , мм/год, перевищуваних протягом 0,01% часу. Ці значення мають отримуватися на підставі тривалих спостережень за випаданням дощів, здійснюваних із використанням дощомірів, які мають часову розрізняльну здатність 1 хв. Якщо стосовно регіону, який нас цікавить, відповідних даних за результатами тривалих спостережень немає, то такі значення можна визначити за картами, наведеними в Рекомендації Р.837 МСЕ-Р. Для розглядуваної частоти та поляризації «погонне» послаблення можна далі розрахувати згідно з Рекомендацією Р.838 МСЕ-Р. Статистичні дані щодо кліматичних змін вміщено в Рекомендації Р.453 МСЕ-Р.

При наземному поширенні радіохвиль за умов ясного неба можуть спостерігатися завмирання, зумовлені дифракцією, багатопроблемним поширенням в атмосфері та вздовж земної поверхні, розширенням променя, розфокусуванням антени, послабленням в атмосферних газах, а у деяких регіонах – піщаними та пиловими бурями. У Рекомендації

Р.530 МСЕ-Р описано методи прогнозування процесів поширення радіохвиль на трасах прямої видимості з урахуванням більшості цих явищ. При цьому використовується модель, що враховує такі основні чинники впливу на характеристики поширення:

- субрефракцію, яка призводить до екранування радіохвилі перешкодою;
- посилення сигналу через виникнення хвилевідних умов поширення;
- відбиття радіохвиль від шаруватих неоднорідностей тропосфери;
- відбиття радіохвиль від підстильної поверхні;
- послаблення в гідрометеорах;
- деполяризація радіохвиль через багатопрореневість та дощі;
- спотворення сигналу через частотно-селективні завмирання (ЧСЗ).

На трасах земля-космос важливе значення мають такі явища поширення радіохвиль, як послаблення сигналу, причому за рахунок мерехтіння та деполяризація сигналу, до того ж важливість кожного з цих явищ визначається геометрією траси, кліматом і параметрами системи зв'язку. Додаткову інформацію можна знайти в Рекомендаціях Р.679 МСЕ-Р, Р.680 МСЕ-Р, Р.681 МСЕ-Р та Р.682 МСЕ-Р. У Рекомендації Р.618 МСЕ-Р наведено методи визначення втрат сигналу в разі поглинання в газах та послаблення під час дощу. Просторове рознесення може значно знизити рівень послаблення, що відповідає заданій річній частці (у відсотках) часу на трасах, які зазнають значного послаблення, а також зменшити ефекти мерехтіння та деполяризації. У Рекомендації Р.618 МСЕ-Р також наведено метод прогнозування глибини завмирань, зумовлених мерехтіннями, для частки пори року, що коливається між 0,01 та 50%. Асиметричні розсіювальні об'єкти (дощові краплі, кристали льоду) на трасі поширення радіохвиль призводять до деполяризації сигналу в системах зв'язку з повторним використанням частот та із застосуванням подвійної поляризації. У Рекомендації Р.618 МСЕ-Р наведено метод оцінювання кросполяризаційної розв'язки XPD для частот від 8 до 35 ГГц та кутів місця на трасі не більш як 60°. Як чинник, що впливає на очікуване значення XPD за умов дощу, наводиться також опис емпіричної поправки на деполяризацію за рахунок льоду.

Характеристики поширення радіохвиль і методи їх передбачення на трасах тропосферних РРЛ (ТРЛ) наводяться в Рекомендації Р.617 МСЕ-Р для дев'яти кліматичних регіонів світу у вигляді середньорічних втрат передавання для різних частот і часток (у відсотках) часу та різної довжини трас. Моделі поширення радіохвиль у радіослужбах мовлення та системах «точка-зона» («точка-багаточка», безпроводовий доступ, локальні радіомережі) у діапазоні частот від 300 МГц до 100 ГГц містяться в Рекомендаціях Р.1146, Р.1238, Р.1410, Р.1411, Р.1546-2.

#### **2.4 Аналіз поширення радіохвиль у діапазоні частот понад 20 ГГц**

Основні переваги використання цього діапазону частот, що забезпечують надзвичайні можливості для розподілу та присвоєння частот, безперечно, полягають у широкій доступній смузі частот та менших за розмірами антенах. Головний недолік – висока схильність піддаватись атмосферним ефектам, що призводять до значних послаблень сигналу та обмежують або й унеможливають застосування багатьох систем радіозв'язку. Проте такі ефекти послаблення можна також використати заради забезпечення захисту систем від завад з огляду на значно вищі втрати у вільному просторі на цих частотах.

Цей діапазон частот характеризується «вікнами», які являють собою смуги з порівняно низьким послабленням, та смугами поглинання, де спостерігається дуже високе послаблення. Вікна та смуги поглинання визначаються, передусім, поглинальними властивостями газів, здебільшого кисню та водяної пари. Поглинання в кисні досягає максимуму на частотах 60 та 119 ГГц, а поглинання у водяній парі – поблизу частот 22 ГГц та 183 ГГц. Проте сліди газів можуть істотно впливати на послаблення за відсутності водяної пари на частотах понад близько 70 ГГц. Методика визначення середніх значень густини водяної пари в атмосфері поблизу земної поверхні, що відчутно впливає на системи, які працюють на частотах понад 20 ГГц, наведено в Рекомендації Р.836 МСЕ-Р.



3 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.

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 [3]:

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 [1-3] для антен РЕЗ 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 [1-3]:

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} (D\varphi/\lambda)^2, \quad \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m,$$

$$G(\varphi) = G_1, \quad \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \max(\varphi_m, \varphi_r),$$

$$G(\varphi) = 29 - 25 \lg \varphi, \quad \text{при } \max(\varphi_m, \varphi_r) \leq \varphi < 48^\circ,$$

$$G(\varphi) = -13, \quad \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ,$$

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;

$$\varphi_m = 20 \lambda / D \sqrt{G_{\max} - G_1},$$

$$\varphi_r = 12,02 (D/\lambda)^{-0,6}.$$

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

$$G(\varphi) = G_{\max} - 2,5 \times 10^{-3} (D\varphi/\lambda)^2, \quad \text{при } 0^\circ < \varphi < \varphi_m,$$

$$G(\varphi) = 39 - 5 \lg(D/\lambda) - 25 \lg \varphi, \quad \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 48^\circ,$$

$$G(\varphi) = 3 - 5 \lg(D/\lambda), \quad \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ,$$

$$G(\varphi) = 52 - 10 \lg(D/\lambda) - 25 \lg \varphi, \quad \text{при } (100\lambda/D) \leq \varphi < 48^\circ,$$

$$G(\varphi) = 10 - 10 \lg(D/\lambda), \quad \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

### 3. Загальний опис методики. Початкові дані.

- потужність передавача корисного сигналу, що передає,  $P_{\text{прд}}$ , дБм;
- потужність передавача завади,  $P_{\text{прд}}$ , дБм;
- коефіцієнт підсилення антен для корисного сигналу  $G_{\text{Апрд1}}$ ,  $G_{\text{Апрм1}}$ , дБі
- коефіцієнт підсилення антен для завадового сигналу  $G_{\text{Апрд2}}$ ,  $G_{\text{Апрм2}}$ , дБі;
- втрати в антено-фідерному тракті  $\eta_{\text{прд}}$ ,  $\eta_{\text{прм}}$ ;
- частота випромінювання  $f$ , МГц;
- необхідне захисне відношення  $A(f)$ , дБ;
- чутливість приймача  $P_{\text{ш}}$ , дБм;

- ширина смуги пропускання приймача на рівні  $-30$  дБ,  $B_{ш}$ , МГц ;
- коефіцієнт шуму приймача  $N_{ш}$ , дБм);
- додаткове послаблення на трасі розповсюдження радіохвиль  $L_{доп}$  ;;

**Результуючі дані:**

- величина перевищення рівня (недостатнього рівня) корисного сигналу відносно допустимого, дБ;

**4. Етапи методики (алгоритму її реалізації).**

Алгоритм включає в себе декілька етапів, з яких будується відповідний алгоритм (рис.1).

1. Введення вихідних даних:

- потужність передавача корисного сигналу, що передає,  $P_{прд}$ , дБм (якщо не задано розрахунок ведеться відносно чутливості приймача);
- потужність передавача завади,  $P_{прд}$ , дБм;
- коефіцієнт підсилення антен для корисного сигналу  $G_{Апрд}$ ,  $G_{Апрм}$ , дБі (для ізотропного випромінювання дорівнює 0);
- коефіцієнт підсилення антени для завадового сигналу  $G_{Апрдз}$ , дБі (для ізотропного випромінювання дорівнює 0);
- коефіцієнт послаблення за рахунок поляризації для корисного сигналу  $L_{пол}$ , дБ (по замовчанню дорівнює 0);
- коефіцієнт послаблення за рахунок поляризації для завадового сигналу  $L_{полз}$ , дБ (по замовчанню дорівнює 0);
- відстань між передавачем корисного сигналу та приймачем,  $d$ , км;
- відстань між передавачем завадового сигналу та приймачем,  $d_3$ , км;
- втрати в антено-фідерному тракті передавача, приймача, передавача завадового сигналу  $\eta_{\phi 1}$ ,  $\eta_{\phi 2}$ ,  $\eta_{\phi 3}$  (по замовчанню дорівнюють 0), дБ;
- частота випромінювання  $f$ , МГц;
- необхідне захисне відношення  $A(f)$ , дБ;
- чутливість приймача  $P_{ш}$ , дБм (використовується при відсутності параметрів корисного сигналу, якщо не задана – розраховується);
- ширина смуги пропускання приймача на рівні  $-30$  дБ,  $B_{ш}$ , МГц (для розрахунку чутливості приймача)
- коефіцієнт шуму приймача  $N_{ш}$ , дБм (для розрахунку чутливості приймача);
- додаткове послаблення на трасі розповсюдження радіохвиль  $L_{доп}$ , дБ (дорівнює 0 при рахунку для вільного простору).

2. Якщо задані параметри корисного сигналу (потужність, відстань тощо), перехід до п.3, інакше перехід до п.5.

3. Розрахунок рівня корисного сигналу за формулою:

$$P_c = P_{прд} + G_{Апрм} + G_{Апрд} - \eta_{\phi 1} - \eta_{\phi 2} - L_{пол} - L_{bf} - L_{доп}.$$

4. Розрахунок рівня завадового сигналу за формулою:

$$P_z = P_{прд} + G_{Апрм} + G_{Апрдз} - \eta_{\phi 1} - \eta_{\phi 3} - L_{полз} - L_{bf} - L_{доп}$$

та перехід до п.8.

5. Якщо задана чутливість приймача перехід до п.6, інакше до п.7.

6.  $P_c$  дорівнює чутливості приймача  $P_{ш}$  та перехід до п.4.

7. Розрахунок чутливості приймача:  $P_{ш} = k_B T_0 B_{ш} N_{ш}$  та перехід до п.4.

8. Якщо відношення сигнал/завада перевищує захисне відношення  $A(f)$  перехід до п.10.

9. Вивід негативного результату недостатнього рівня корисного сигналу та перехід до п.11.

10. Вивід позитивного результату достатнього рівня корисного сигналу.

11.Кінець.

**Висновок.** Запропонована методика базується на сучасних рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку, її особливістю є орієнтація на практичну реалізацію для отримання комплексного загального рішення задачі аналізу електромагнітної сумісності засобів зв'язку, яке може бути основою для розрахунків електромагнітної сумісності різних радіозасобів різних радіослужб. На основі запропонованих методик проводиться розробка алгоритмів та спеціального програмного забезпечення (ПЗ) аналізу ЕМС РЕЗ для подальшого використання спеціальними користувачами РЧР України.

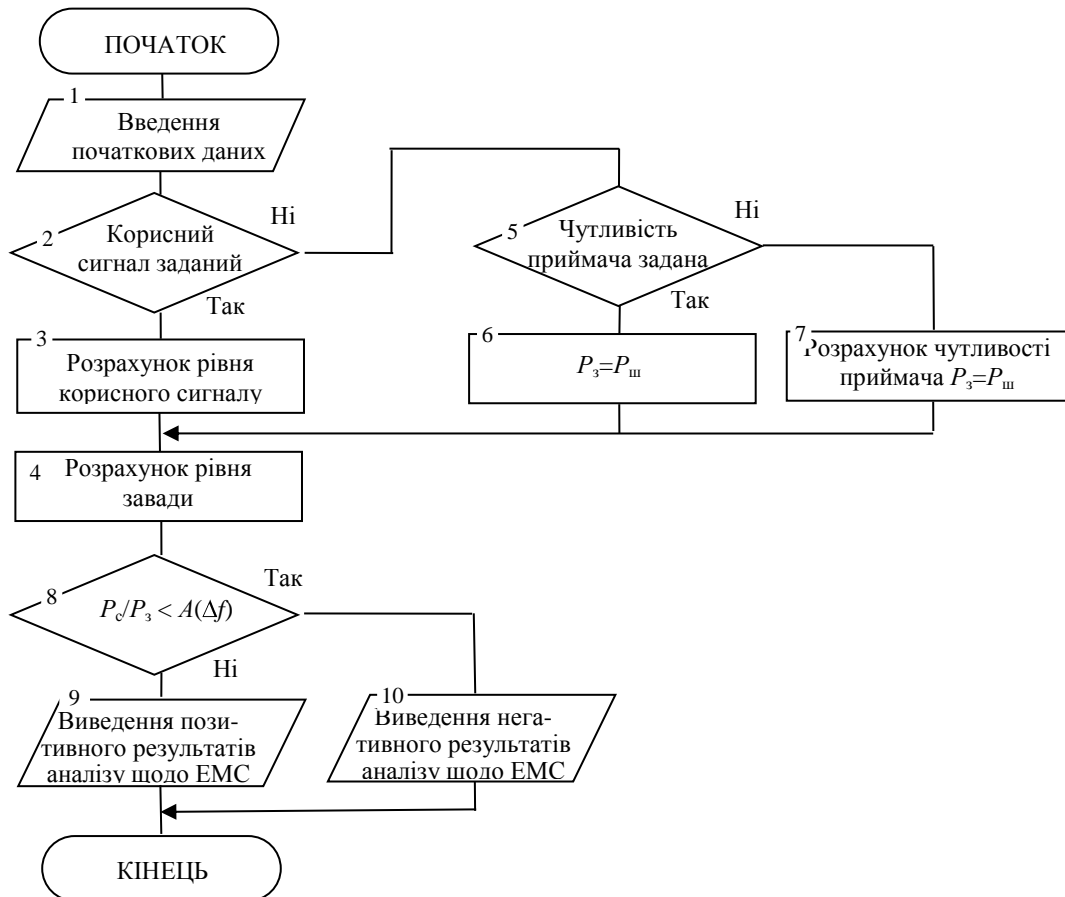


Рис. 1. – Загальний алгоритм розрахунку/визначення електромагнітної сумісності РЕЗ

В подальших дослідженнях пропонується удосконалити методику для врахування особливостей розрахунку ЕМС 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. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу/ За ред. В.Г.Кривуци та Т.М.Наритника. К.:ДУКТ, 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.