

Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО, д-р техн. наук, Н.А. ЧУРСАНОВ

МЕТОДИКА ВИБОРУ КРИТЕРІЮ І АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ УГРУПУВАНЬ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ В МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Постановка задачі

Під критерієм електромагнітної сумісності (ЕМС) розуміється допустиме значення показника ЕМС або декількох показників ЕМС, що однозначно визначає умови виконання ЕМС радіослужб в певній електромагнітній обстановці (ЕМО) [1]. Електромагнітна сумісність – забезпечення можливості спільної роботи різних радіоелектронних засобів (РЕЗ) не створюючи взаємних завад. Завади, що виникають при роботі РЕЗ, впливають як кондуктивно, так і індуктивно, хоча основний вплив відбувається через антену. Тому найчастіше обмежуються розглядом радіозавад. Очевидно, ЕМС виконується тоді, коли рівень завад, що впливають, P_z не перевищує допустимий $P_{z, доп}$. Для нормальної роботи пристрою, при всій очевидності даного вербального визначення, аналітичне його трактування виявляється досить неоднозначне, найчастіше пов'язане з конкретними умовами функціонування тих чи інших РЕЗ. Центральним питанням при цьому є вибір критерію, відповідно до якого укладають: виконується ЕМС чи ні.

При виборі критерію стану ЕМС виникають дві основні задачі:

- як зв'язати і як співвіднести параметри завади з параметрами корисного сигналу і шуму в смузі прийому цього сигналу з тим, щоб можна було судити про ступінь впливу завади на якість роботи РЕЗ;

- як вибрати рівень відліку для оцінки впливу завади.

Складність вирішення цих завдань пов'язана з тим, що в багатьох системах значення корисних сигналів, шумів, а також завад є випадковими, а часто і нестационарними процесами з невідомими поточними параметрами [2 – 6]. Спектри частот корисних сигналів і завад зазвичай різні, з різним ступенем перекриття. Все це стало причиною різноманіття критеріїв, які обираються і неоднозначності в оцінці стану ЕМС.

Мета статті – вибір і удосконалення критерію електромагнітної сумісності угруповань радіоелектронних засобів в мережах мобільного зв'язку.

Основна частина

Для визначення якості прийому сигналів використовують енергетичні співвідношення, частотні відмінності, особливості статистичних параметрів сигналів, завад і шумів. Для визначеності наведено діаграму рівнів сигналу, завади і шуму (рис. 1) [1].

На рис. 1 наведено такі позначення:

P_c – фактичний рівень сигналу на вході приймача, залежить від конкретної траси, але не може перевищувати максимально допустимого рівня (рівня блокування), дБм;

PSR – величина характеризує реальну чутливість приймача для заданої ймовірності помилки $P_{пом}$; ця величина характеризує чутливість приймача і залежить від заданої $P_{пом}$ (10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-6} і т.д.), дБм;

$P_{ш} = 10 \lg kT_{ш} \Delta F$ – рівень власних шумів в смузі прийому, дБм;

$P_{SR}/P_{ш}$ – пороговий рівень для заданої ймовірності помилки $P_{пом}$, дБ;

$M = P_c - P_{SR}$ – запас високочастотного рівня сигналу, дБ;

P_z – рівень завади на вході приймача, дБм;

$P_{ш} + P_z$ – сумарна потужність шуму і завади в смузі прийому, дБм;

P_c – пороговий рівень сигналу на вході приймача при наявності завади для заданої $P_{пом}$, дБм;

$TD = P_c - P_{SR}$ – поріг деградації через заваду. Ця величина еквівалентна збільшенню шуму на вході приймача; може бути отримана шляхом вимірювань, дБ;

$P_c - (P_{ш} + P_3)$ – ця величина показує наскільки сигнал повинен перевищувати сумарний рівень завади і власних шумів приймача, дБ.

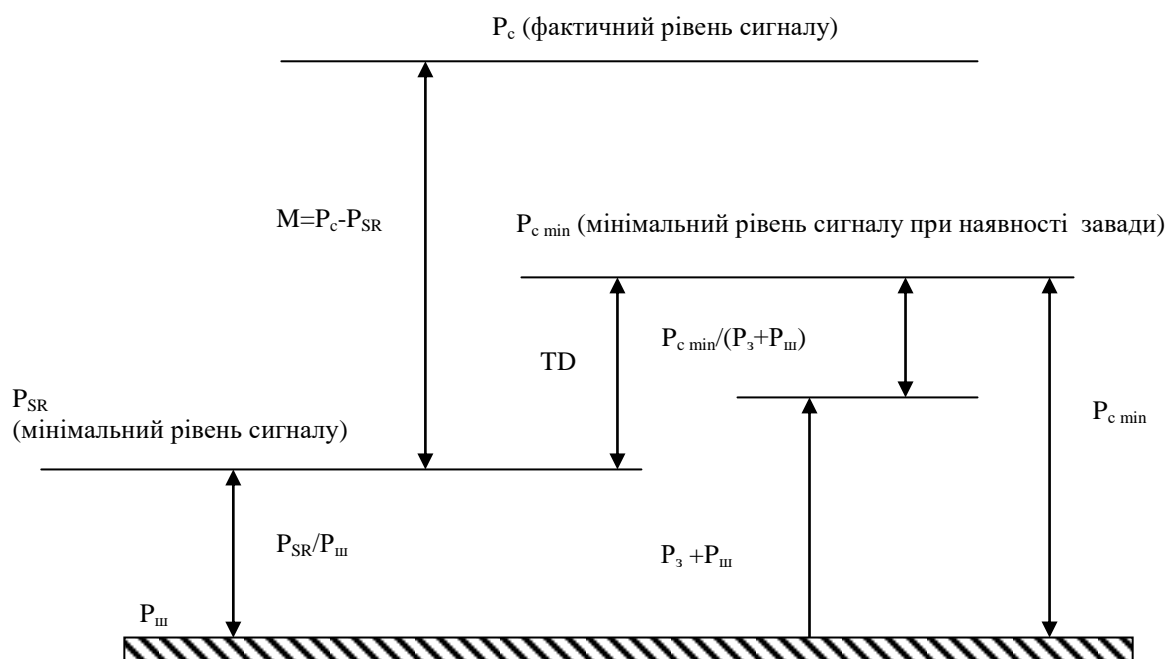


Рис. 1. Діаграма рівнів сигналів, завод і шумів при визначенні критеріїв EMC

Вибір тих чи інших параметрів для оцінки стану EMC залежить від конкретних умов функціонування [7 – 14]. Для того щоб успішно оперувати енергетичними співвідношеннями, бажано, щоб будь-який енергетичний параметр, який бере участь в розрахунках, був постійним. В якості такого часто використовують рівень шуму $P_{ш}$, щодо якого здійснюється відлік інших енергетичних параметрів.

Найпростішою ситуацією є та, при якій постійним є рівень не тільки шуму, але і корисного сигналу P_c . Такі умови мають місце в супутникових системах зв'язку, де флуктуації ΔP_c зазвичай не перевищують 1 – 2 дБ. Це дає підставу взяти в якості допустимого рівень завади -27 – -30 дБ, по відношенню до сигналу, що знаходиться на рівні технологічної розв'язки в НВЧ трактах. Рівень шуму при цьому до уваги можна не брати, оскільки необхідне відношення $h^2 = P_c / P_{ш}$ в супутникових системах закладається ще на етапі розробки системи і зокрема ретрансляторів зв'язку.

На жаль, в інших системах радіозв'язку: радіорелейних, тропосферних, стільникових, в системах абонентського радіодоступу рівень $P_c = var$. Це призводить до необхідності всі розрахунки за оцінкою EMC здійснювати, використовуючи в якості базового критерію рівень шуму $P_{ш}$ або рівень чутливості P_{SR} .

Одним з досить простих і універсальних методів оцінки стану EMC є використання захисного відношення. Захисним відношенням вважається мінімально допустиме відношення сигнал/завада, при якому якість зв'язку не погіршується:

$$A = \min(P_c / P_3)_{don}, \quad (1)$$

Разом з тим, поряд з простотою захисне відношення є досить наближеною оцінкою, хоча воно рекомендовано в ряді керівних документів для використання в якості критерію (Реко-

мендації МСЕ-Р S.735, S.1323, S.1325, S.1329, S.1418) [7]. Недоліками цього критерію є те, що при цьому не враховується ступінь збитку, що завдала завада з тією чи іншою частотно-часовою і статистичною структурою. Так, на рис. 2 надано можливий варіант співвідношень спектральної густини сигналу (СГС), завади (СГЗ) і смуги частот фільтра приймача (СЧФ).

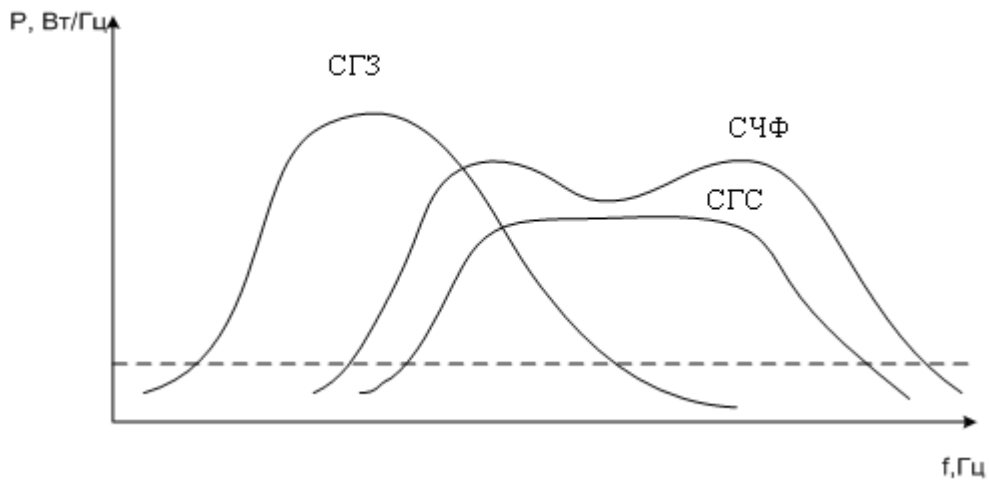


Рис. 2. Співвідношення спектральної густини сигналу, завади і смуги частот фільтра приймача

Є декілька методів оцінки зазначених частотних відмінностей. Так, в [1] рекомендується використовувати відповідний коефіцієнт, що враховує вибірковість приймача:

$$N(\Delta f) = 10 \lg \left(\frac{\Delta F}{\Delta F_{РПД}} \right), \quad (2)$$

де ΔF – перекриття смуги випромінювання радіопередавача (РПД) і радіоприймача (РПМ) на рівні -30 дБ; $\Delta F_{РПД}$ – робоча смуга частот передавача, Гц.

Більш точним є врахування особливостей структури спектрів, що приводить до відношення згорток спектрів сигналу і завади:

$$h_{cn}^2 = \frac{D_c(F, \delta f)}{D_z(F, \delta f)}, \quad (3)$$

де F – середня частота спектра сигналу (завади); δf – різниця несійних частот корисного сигналу і завади; $D_c(F, \delta f)$ – згортка спектра корисного сигналу з частотною смугою приймача; $D_z(F, \delta f)$ – згортка спектра завади з частотною смугою приймача.

Згортка спектрів визначається як

$$D_i(F, \delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(q) g_{np}(q, \delta f) dq, \quad (4)$$

де i – відповідно сигнал чи завада, $g_c(q) = F_c \cdot W_c(F)$ – нормалізований енергетичний спектр корисного сигналу; $g_z(q) = F_z \cdot W_z(F)$ – нормалізований енергетичний спектр завади; $g_{np}(q) = F_{np} \cdot W_{np}(F)$ – нормалізована смуга пропускання приймача.

Завад може бути декілька, а також з урахуванням наявності теплових шумів вираз (3) перетвориться до вигляду

$$h_{\Sigma}^2 = \frac{D_C(F, \delta f)}{\sum_i D_{3i}(F, \delta f) + D_{ш}}, \quad (5)$$

де $D_{ш}$ – спектральна густина потужності (СГП) шуму в приймальному пристрої.

Значення згортки $D_C(F, \delta f)$, $D_n(F, \delta f)$, $D_{ш}$ можна отримати, якщо відома аналітична залежність рівня СГП від частоти для кожного з компонентів сигналу, завод і шуму. На практиці така залежність часто невідома. В умовах такої невизначеності допустимо використовувати показник відношення рівня потужності сигналу до суми потужностей завод і шуму (ВСЗШ):

$$h_{ВСЗШ}^2 = P_C / (\sum_i P_{3i} + P_{ш}). \quad (6)$$

Діючи таким чином (6), можемо помилитися в один або в інший бік. Однак з огляду на те, що ентропія білого гаусівського шуму більше ентропії будь-якого відмінного від шуму сигналу, можна стверджувати, що розрахункове значення виявиться трохи менше реального. Таке зміщення призведе до декілька завищених показників, тобто реальна обстановка виявиться дещо кращою.

Показники, що характеризують ЕМС, можуть бути конкретизовані і модифіковані. В рекомендаціях МСЕ – Р (S.523, S.1323, S.738) [8] пропонується знаходити співвідношення $P_3/P_{ш}$ або аналогічне йому $\Delta T_{ш}/T_{ш}$, які показують ступінь збільшення рівня еквівалентного шуму (або його температури) за рахунок впливу P_3 .

Також застосування знаходить такий критерій як поріг деградації приймача через вплив завади TD, який показує, на скільки повинен бути збільшений мінімальний рівень сигналу на вході приймача при наявності завади для заданої $P_{ном}$ (рис.1):

$$TD = P_C - P_{SR}. \quad (7)$$

В [1] показано, що параметр TD, дБ, може бути визначений як

$$TD = 10 \lg(1 + 10^{0,1(P_3 - P_{ш})}). \quad (8)$$

Для захисту фіксованих ліній від адитивної завади прийнято, що величина TD не повинна перевищувати 1 дБ, таким чином з виразу (8) випливає, що:

$$P_{здон}(\text{дБ}) = P_{ш}(\text{дБ}) - 6. \quad (9)$$

Співвідношення $\left(\frac{P_3}{P_{ш}}\right)_{дон} \leq \left(\frac{P_3}{P_{ш}}\right)_{дон}$ є досить переконливим критерієм. З (9) випливає, що

для того щоб дія завади практично не була проявлена, потрібно $\left(\frac{P_3}{P_{ш}}\right)_{дон} \leq -6$ дБ. Цей критерій дає гарантований результат, однак на практиці його застосувати досить складно, бо він є дуже жорсткий. На практиці зазвичай $P_C > P_{SR}$, на кілька децибел або навіть десятків децибел (в РРЛ $P_C - P_{SR} = 40...50$ дБ). Разом з тим, якщо вдається забезпечити рівень завод на 6 дБ нижче рівня шуму, то ЕМС надійно забезпечена.

У документах МСЕ (МСЕ-Р S.466, S.483, S.1429, S.1432, S.1560, S.1593, SF.356, SF.357, SF.615, SF.674, SF.1572, F.1094, F.1241, F.1331, F.1398, F.1565) [7] критерії засновані на впливі завади на якісні показники передачі сигналу – ймовірність помилки, неготовність, коефіцієнт зіпсованих секунд (ES, SES) і т.п. В цьому випадку конкретизованими є якісні показники передачі сигналів: ймовірності помилки $P_{ном}$, коефіцієнта надійності H або ненадійності $T = 1-H$,

які виражено у відсотках часу, протягом якого виконується вимога до якості QoS; коефіцієнт зіпсованих секунд (ES, SES); зменшення пропускної здатності лінії або системи в цілому та ін.

Імовірність появи помилкового біта при некогерентному прийомі ортогональних сигналів

$$P_{ном} = 0,5 \exp\{-Kh^2\}, \quad (10)$$

де $K = 1/2$ – при АМ; $K = 1$ – при ЧМ; $K = 2$ – при ФМ; h^2 – визначається співвідношенням (6). Очевидно, даний показник крім типу модульованого сигналу не дає додаткової інформації про умови ЕМС.

Рівень впливу завади і погіршення умов ЕМС проявляється також у зниженні пропускної здатності. Для розрахунку пропускної здатності сигналів з потужністю P_c на фоні шумів $P_{ш}$ використовують формулу Шеннона:

$$C = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}}\right), \quad (11)$$

де ΔF – полоса пропускання каналу.

Очевидно, замінюючи $P_{ш}$ на $P_{ш} + \sum_i P_{zi}$, можна якісно оцінити втрати пропускної здатності каналу при даній СЗО. Цей критерій пропонується використовувати при проектуванні мереж мобільного зв'язку.

Є також рекомендація [9] використовувати показник зменшення енергетичного запасу EML (Energy Margin Loss), який показує наскільки буде зменшений (втрачений) запас високочастотного рівня в радіолінії за рахунок дії даної конкретної завади.

Для розрахунку ЕМС за критерієм EML необхідно мати в розпорядженні значення показників якості QoS системи зв'язку. Наприклад, показником якості може бути відсоток часу F_n , в якому EML може бути перевищений (тобто для забезпечення нормального функціонування системи із заданою якістю обслуговування він не повинен перевищуватися у відсотку часу $1 - F_n$).

З урахуванням способів передачі сигналу (модуляції, кодування) і прийому (демодуляції, декодування) за наявними в літературі розрахунковими або експериментальними даними визначаються значення відношення корисного сигналу до шуму $h_0^2 = P_c / P_{ш}$ і значення відношення корисного сигналу до еквівалентного шуму, що є сумою потужностей усіх завад (6).

Для суміщення повинні бути визначені інтегральні функції розподілу за часом сигналу $F(P_c)$ і завади $F(P_z)$, вплив якої оцінюється. Причиною зміни в часі сигналу і завади є зміна умов поширення, зміна відстані від джерел сигналу і завади і т.п.

За функціями розподілу $F(P_c)$ і $F(P_z)$ слід побудувати функцію розподілу $F(h_0^2)$ відношення сигналу до теплового шуму, яка відрізняється від $F(P_c)$ тільки масштабом аргументу, і функцію розподілу $F(h_{БСЗШ}^2)$, відношення сигналу до суми шуму і завади, яка розраховується за відомим співвідношенням теорії ймовірностей для розподілу відношення двох випадкових величин з відомими функціями розподілу.

Показник EML розраховується відповідно до виразу

$$EML = h_0^2(F) - h_{БСЗШ}^2(F). \quad (12)$$

де $h_0^2(F)$, $h_{БСЗШ}^2(F)$ – значення відношення сигналу до шуму і відношення сигналу до суми шуму і завади при заданій для показника якості ймовірності P_0 ; P_0 – номінальне значення потужності корисного сигналу.

Співвідношення (12) пояснює рис. 3, де h_n^2 – порогове значення відношення сигналу до шуму, яке відповідає необхідному показнику якості при ймовірності F_n , M_0 – енергетичний запас при відсутності завади, M_i – запас при впливі завади, $F(h_{BC3II}^2)$ – функція при збільшенні потужності сигналу на величину EML.

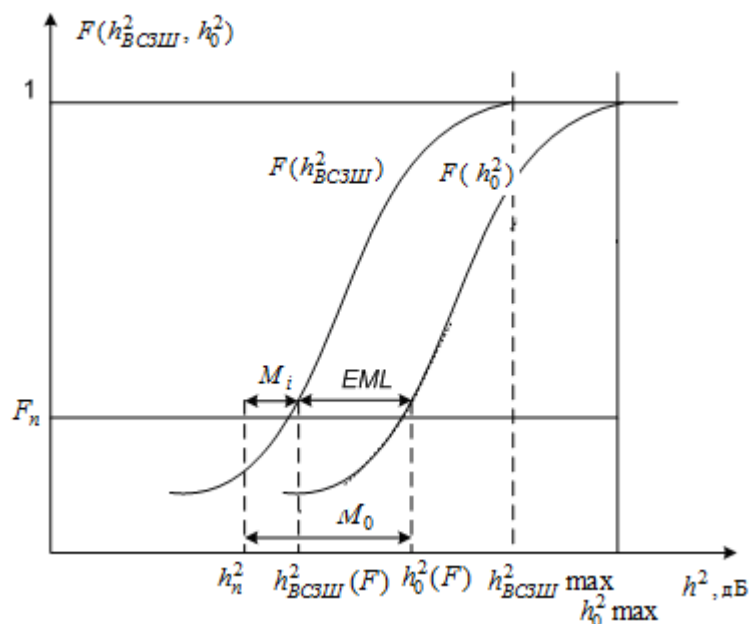


Рис. 3. Визначення значення EML за ймовірністю забезпечення якості

Недоліком критерію EML є те, що при цьому не враховується ступінь шкоди завади з тією чи іншою частотно-часовою і статистичною структурою.

З розвитком сімейства технологій ІМТ (International Mobile Telecommunications) удосконалюються і методи оцінки умов їх електромагнітної сумісності між собою і з іншими РЕЗ, які в своїй основі мають враховувати специфічні особливості кожної технології. Використання радіочастот за принципом технологічної нейтральності вимагає визначення деякого узагальненого критерію ЕМС. У зарубіжній практиці в якості такого критерію в проекті WARECS запропоновано використовувати крайову маску блоку ВЕМ, яка є "регуляторною" спектральною маскою в блоці спектра, що виділено оператору [10, 11]. Рефармінг радіочастотного спектру вимагає розробки умов спільного функціонування мереж декількох стандартів в суміжних смугах частот в межах одного діапазону. Також необхідно враховувати і варіанти комбінованого використання несійних частот DC/DB (Dual Carrier/Dual Band) при агрегуванні в UMTS.

В [12] запропоновано критерій енергетичної еквівалентності для оцінки ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектру. Суть рефармінгу полягає в можливості додаткового використання раніше виділених смуг радіочастот, наприклад GSM, іншою, більш новою технологією стільникового зв'язку. В результаті такої процедури в одному частотному діапазоні можуть поєднуватися декілька технологій.

Критерій вводиться для спрощення оцінки та виконання умов ЕМС при рефармінгу. Критерій базується на еквівалентності енергетичних характеристик в мережі, що замінюється, і новій мережі різних стандартів, досить тільки врахувати відмінні риси різних стандартів РЕЗ [12]. Практична значимість такого підходу полягає в тому, що умови ЕМС для більш "динамічних" радіоінтерфейсів LTE можуть бути визначені на базі вже апробованих умов для діючих мереж GSM зі значно меншими витратами. Використовуючи запропонований критерій, можна на етапі планування фрагмента мережі з новою технологією, визначити його

склад за кількістю передавачів і допустимій потужності їх випромінювання. Це дозволяє виключити можливу надмірність частотно-територіального плану, що формується для фрагмента мережі, що в кінцевому підсумку може вплинути на вартість експертизи ЕМС. І, нарешті, запропонований критерій є універсальним і може бути використаний по відношенню до інших потенційно несумісних РЕЗ, для цього слід лише вибрати відповідну ширину смуги пропускання його приймача.

Енергетична еквівалентність в зазначених умовах полягає в балансі енергетики, що випромінюється каналами GSM і LTE в смузі пропускання потенційно несумісного РЕЗ. Це ствердження описується математично [12], а еквівалентність енергетики завод від мереж GSM і LTE в загальному має вигляд

$$P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PЭС}) \leq P_{T\Sigma GSM}(\Delta f_{PЭС}), \quad (13)$$

де $P_{T\Sigma GSM}(\Delta f_{PЭС})$, $P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PЭС})$ – сумарні потужності передавачів базових станцій (БС) GSM і LTE в смузі пропускання $\Delta f_{PЭС}$ потенційно несумісного РЕЗ відповідно.

Ступінь можливого збільшення потужності потенційної заводи від LTE щодо діючої заводи від GSM в смузі частот $\Delta f_{PЭС} = a \cdot m_f \Delta f_{GSM}$ описується співвідношенням [12]

$$\eta = \frac{P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PЭС})}{P_{T\Sigma GSM}(\Delta f_{PЭС})} = \frac{S_{\Sigma(\Delta f_{PЭС})LTE} \cdot \Delta f_{LTE}}{S_{cp(\Delta f_{PЭС})GSM} \cdot \Delta f_{GSM}} = \frac{P_{TLTE}}{P_{TGSM}} (1 - \beta_{LTE}) \alpha \frac{n_{TLTE} N_{LTE}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{iGSM}) n_{GSM}(f_i)}, \quad (14)$$

де $S_{\Sigma(\Delta f_{PЭС})LTE}$ – сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС LTE, близька до рівномірної в смузі $\Delta f_{PЭС}$; $S_{cp(\Delta f_{PЭС})GSM}$ – середня сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС GSM в смузі частот $\Delta f_{PЭС}$ (усереднена по смузі $\Delta f_{PЭС}$); Δf_{GSM} , Δf_{LTE} – смуги частот (ширина каналу) GSM і LTE відповідно; m_f – параметр, що характеризує кількість можливих частотних каналів GSM в смузі LTE, $1 \leq m_f \leq \left\lceil \frac{\Delta f_{LTE}}{\Delta f_{GSM}} \right\rceil$, $[x]$ – ціла частина числа; $n_{TGSM}(f_i)$ – число передавачів GSM, що випромінюють на одній заводовій ("активній") частоті f_i ; n_{TLTE} – кількість передавачів на площадці LTE (з урахуванням MIMO); N_{LTE} – кількість площадок, на яких планується установка передавачів LTE; β_{GSM} – показник, що враховує чинні обмеження потужності БС GSM, ($0 < \beta_{GSM} < 1$); β_{LTE} – ступінь можливого обмеження потужності передавачів LTE за умовами ЕМС з РЕЗ ($0 < \beta_{LTE} < 1$); L_f – кількість "активних" частот, які не повторюються (частотних каналів) GSM в смузі приймача РЕЗ; α – параметр, який показує, наскільки смуга РЕЗ більше (менше) смуги LTE:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\Delta f_{PЭС}}{\Delta f_{LTE}}, & \Delta f_{LTE} > \Delta f_{PЭС}, \\ 1, & \Delta f_{LTE} \leq \Delta f_{PЭС}. \end{cases} \quad (15)$$

Коли канал LTE Δf_{LTE} ширше смуги пропускання РЕЗ $\Delta f_{PЭС}$, енергетика LTE потрапляє в неї частково в залежності від співвідношення цих смуг (параметра α). В іншому випадку, коли $\Delta f_{LTE} \leq \Delta f_{PЭС}$, енергетика LTE повністю зосереджена в смузі РЕЗ, незалежно від зазначеного співвідношення (тому $\alpha = 1$).

Очевидно, що умовою збереження ЕМС за критерієм енергетичної еквівалентності є співвідношення виду

$$\eta = \frac{P_{TLTE}}{P_{TGSM}} (1 - \beta_{LTE}) \alpha \frac{n_{TLTE} N_{LTE}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{iGSM}) n_{GSM}(f_i)} \leq 1, \quad (16)$$

відповідно до якого сумарна потужність завади в смузі частот $\Delta f_{PЭС}$ від мережі LTE не перевищуватиме еквівалентну потужність завади, яка створювалась раніше в цій смузі мережею GSM.

За умов повторного використання радіочастот в мережі GSM кожен з цих передавачів знаходиться на одній з площадок, що входять до складу окремого кластера. Отже, число передавачів GSM з частотою f_i , що повторюється, буде залежати від загальної кількості майданчиків GSM (N_{GSM}) і коефіцієнта повторного використання частот в мережі (K), під яким будемо розуміти розмір кластера. З урахуванням цього припущення при сумісних площадках, коли $N_{GSM} = N_{LTE}$, маємо

$$n_{TGSM}(f_i) = \frac{N_{GSM}}{K} = \frac{N_{LTE}}{K}. \quad (17)$$

Крім того, кількість частот L_f також пов'язана з цим коефіцієнтом:

$$L_f = K(l_1 + l_2 + l_3), \quad (18)$$

де l_1, l_2, l_3 – кількість передавачів в межах одного трисекторного стільника (площадки).

З урахуванням цього:

$$\eta = \frac{P_{TLTE}}{P_{TGSM}} (1 - \beta_{LTE}) \alpha \frac{n_{TLTE}}{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iGSM})}{K_i}} \leq 1. \quad (19)$$

Цей вираз дозволяє оцінити допустиму кількість передавачів LTE (n_{TLTE}) на одній площадці, при якій не буде порушена енергетична еквівалентність:

$$n_{TLTE} \leq \frac{P_{TGSM}}{P_{TLTE}} \frac{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iGSM})}{K_i}}{(1 - \beta_{LTE})} \frac{1}{\alpha}. \quad (20)$$

Наведені співвідношення будуються на припущенні, що антени БС GSM і LTE за типом і азимутом випромінювання ідентичні. Вираз (20) дозволяє визначити умови збереження енергетичної еквівалентності мережі GSM в смузі частот відповідної ширини, що планується для створення мережі LTE при рефармінгу, а саме:

- обчислити допустиме число передавачів LTE на кожній з GSM площадці при плануванні секторів і конфігурацій МІМО на них;
- оцінити (в разі необхідності) необхідне обмеження потужності випромінювання передавачів LTE.

При аналізі СЗО і оцінюванні EMC РЕЗ мережі на етапі її функціонування необхідно проводити моніторинг спектра на наявність завад і корисного сигналу. Так, в мережі LTE абонентська станція (АС) проводить спеціальні вимірювання, в рамках яких обчислюється значення RSRP [13]. RSRP (Reference Signal Received Power) – це середнє значення потужності прийнятих пілотних сигналів (Reference Signal). При повідомленні БС RSRP передається не його значення, а індекс з табл. 1.

Індекси і відповідні значення RSRP

Індекс	Значення RSRP, дБм
0	RSRP < -140
1	-140 ≤ RSRP < -139
2	-139 ≤ RSRP < -138
.....
n	n-139 ≤ RSRP < n-140
.....
96	-45 ≤ RSRP < -44
97	-44 ≤ RSRP

Даний індекс використовується під час процедур підключення до мережі АС, вибору стільника, а також процедури хендовера. З огляду на той факт, що в мережі LTE кожні 0,5 мс проводять виміри характеристик каналу і кожні 40 мс відправляються звіти про середні значення вимірних параметрів [14], RSRP можна так само використовувати для оцінки EMC РЕЗ мережі, тобто вважати вимірне значення RSRP потужністю сигналу в відомому частотному діапазоні $P_c(t, \Delta f_1)$. Для аналізу EMC РЕЗ мережі необхідно так само проводити вимірювання потужностей завад в певному частотному діапазоні $P_z(t, \Delta f_2)$. Подібна процедура вже передбачена в мережах когнітивного радіо. Вона використовується при моніторингу спектра на наявність вільних каналів. Рівень власних шумів приймача вважаються відомими $P_{uu}(f_1)$. Таким чином, на підставі даних вимірювань розраховується ВСЗШ в реальному масштабі часу:

$$h^2(t) = \frac{P_c(t, \Delta f_1)}{P_z(t, \Delta f_2) + P_{uu}(f_1)}. \quad (21)$$

На рис. 4 наведено можливий сценарій в момент вимірювань потужності сигналу $P_c(t, \Delta f_1)$, потужності завади $P_p(t, \Delta f_2)$ і шуму $P_{uu}(f_1)$. Як видно з даного рисунка завада частково потрапляє в частотний діапазон сигналу.

За допомогою аналізатора спектра проведено вимірювання потужності сигналу $P_c(t, \Delta f_1)$ і потужності завади $P_n(t, \Delta f_2)$ протягом 20 мс і розраховане ВСЗШ. На рис. 5 показано результати вимірювань ВСЗШ в часі. Як видно з рисунка, ВСЗШ на вході приймача безперервно змінюється. Нами запропоновано вимірювання і оцінку критерію ВСЗШ виконувати на стороні АС в реальному масштабі часу. Таким чином, в кожній точці простору знаходження АС буде відома СЗО. Результати вимірювань і оцінку ВСЗШ АС відправляє БС для наступного прийняття рішень на управління.

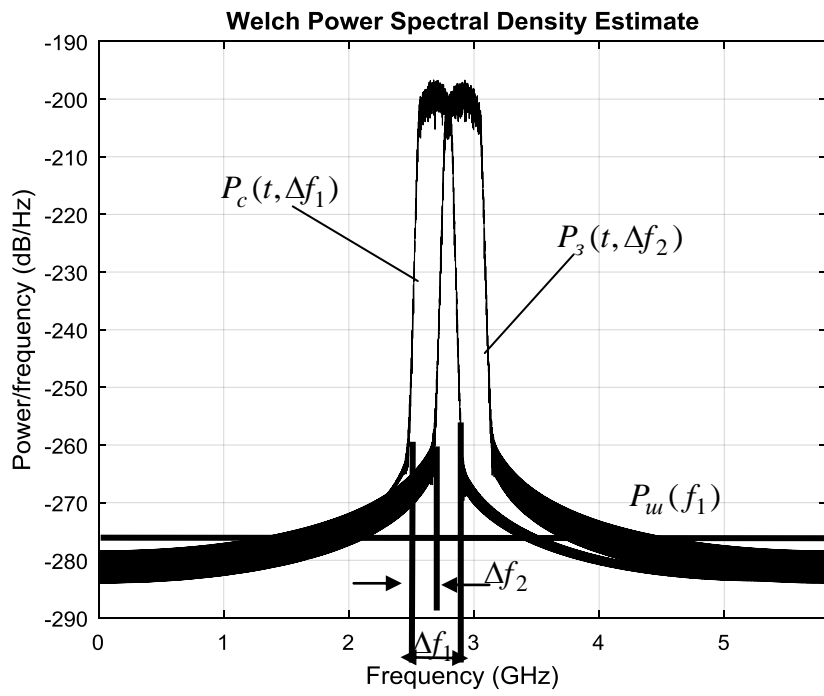


Рис. 4. Можливий сценарій в момент вимірювань потужності сигналу $P_c(t, \Delta f_1)$, потужності завади $P_3(t, \Delta f_2)$ і шуму $P_u(f_1)$

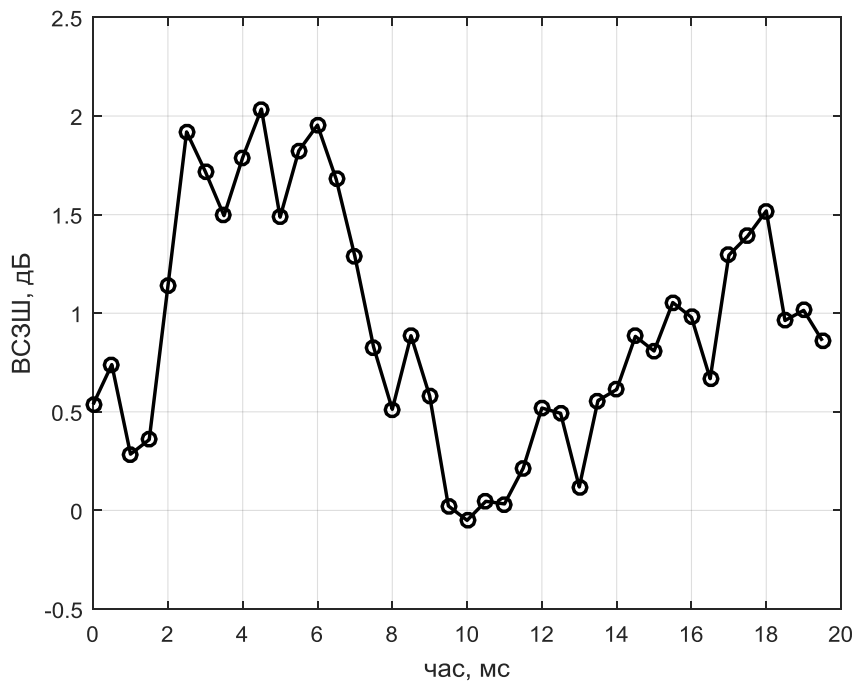


Рис. 5. Результати вимірювань і оцінки ВСЗІ

Висновки

Для багатьох РЕЗ параметри корисних сигналів, шумів і завад є випадковими, а часто і нестационарними процесами з невідомими поточними характеристиками. Спектри частот корисних сигналів і завад зазвичай різні, з різним ступенем перекриття. Все це стало причиною різноманіття критеріїв і неоднозначності в оцінці ЕМС.

Представлена методика вибору критерію і аналізу ЕМС дозволяє якісно і кількісно аналізувати електромагнітну обстановку і якість зв'язку в системах радіодоступу з багаточастотними сигналами, як на етапі проектування, рефармінга, так і на етапі функціонування мережі.

Список літератури:

1. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / В.И. Владимиров, А.Л. Докторов и др. ; под ред. Н.М. Царькова. Москва : Радио и связь, 1985. 272 с.
2. Бородич С.В. Защитные отношения для сигналов, используемых в спутниковых системах связи // Труды НИИР. 1990. № 4. С. 7–11.
3. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем : учеб. пособие ; под ред. М.А. Быховского. Москва : Эко-Трендз, 2006. 376 с.
4. Малицкий А.Г., Мельникова Л.И., Олейник В.Ф. // Сб. Тезисов НТК «Методы передачи, приема и обработки информации». Туапсе, 1998.
5. Поповский В.В., Левчук П.Ф. Проблема ЭМС и методы ее решения средствами антенной техники / Краткий текст лекций. Ленинград : ВАС, 1987. 80с.
6. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. Москва : Радио и связь, 1983. 272 с.
7. Рекомендации МСЭ-R S.466, S.483, S. S.1429, S.1432, S.1560, S.1593, SF.356, SF.357, SF.615, SF.674, SF.1572, F.1094, F.1241, F.1331, F.1398, F.1565.
8. Рекомендации МСЭ-R. S.523, S.1323, S.738.
9. Кантор Л.Я. Универсальный показатель совместимости радиосистем. Москва : Электросвязь, 2004. №10. С. 23-25.
10. CEPT Report 19. Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to develop least restrictive technical conditions for frequency bands addressed in the context of WAPECS. Electronic Communications Committee (ECC). 2008.
11. Скрынников В.Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика. Москва : Спорт и Культура-2000, 2012. С. 865.
12. Скрынников В.Г. Новый критерий для оценки условий ЭМС при рефарминге радиочастотного спектра // Наука. Технологии. Производство. 2015. № 3 (7). С. 45–58.
13. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных : учеб. пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
14. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. Москва : Эко-Трендз, 2010. 284 с.

*Харківський національний
університет радіоелектроніки*

Надійшла до редколегії 05.04.2020