

УДК 621.396.677.49

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ УГРУПУВАНЬ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ В МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ПРИ РЕФАРМІНГУ РАДІОЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ



Ю.Ю. КОЛЯДЕНКО, М.О. ЧУРСАНОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The article analyzes the EMC during refarming using the criterion of energy equivalence. The analysis allows us to determine the conditions for maintaining the energy equivalence of the GSM network in the frequency band of the corresponding width, which was planned to create the LTE network during refarming, namely: calculate the allowable number of LTE transmitters at each GSM site when planning sectors and MIMO configurations on them; estimate (if necessary) the limitation of the radiation power of the LTE transmitters. The dependences of the energy equivalence index on the number of frequencies that are not repeated in the receiver band of the RES for various LTE channel widths are obtained. The obtained dependences show a decrease in the energy equivalence indicator with an increase in the number of frequencies that are not repeated. The dependences of the energy equivalence index on the degree of possible limitation of the power of LTE transmitters for various LTE channel widths are obtained. These dependences show a decrease in the energy equivalence rate while increasing the degree of possible power limitation of LTE transmitters. The dependences of the energy equivalence index on the number of LTE transmitters are obtained for various LTE channel widths, which show an increase in the energy equivalence index with an increase in the number of LTE transmitters. The dependences of the permissible number of LTE transmitters on the LTE channel width are obtained for various values of the number of frequencies that are not repeated in the receiver band of the RES. The analysis showed that it is possible to increase the allowable number of LTE transmitters and observe EMC conditions by increasing the LTE channel width and by increasing the number of frequencies that are not repeated in the receiver band of the RES. The above results allow us to evaluate and plan the possible architecture of the created LTE radio network in specific situations. For example, if for some conditions the allowable number of transmitters on the LTE site is calculated to be insufficient, it can be increased due to some reduction (limitation) of the radiation power of these transmitters, while maintaining energy equivalence.

Анотація – У статті проведено аналіз критерію енергетичної еквівалентності, який запропоновано використовувати при рефармінгу радіочастотного спектру, що дозволить визначити умови збереження енергетичної еквівалентності мережі GSM у смузі частот відповідної ширини, що планується для створення мережі LTE при рефармінгу, а саме: обчислення допустимої кількості передавачів LTE на кожному GSM-майданчику при плануванні секторів і конфігурації MIMO на них; оцінювання (в разі необхідності) необхідного обмеження потужності випромінювання передавачів LTE. Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE, які показали зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості частот, які не повторюються. Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE, які підтвердили зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE. Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE, які показали збільшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості передавачів LTE. Також отримано залежності допустимої кількості передавачів LTE від ширини каналу LTE при різних значеннях кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ, аналіз яких довів, що збільшити допустиму кількість передавачів LTE та дотриматись умов EMC можна за рахунок збільшення ширини каналу LTE та за рахунок збільшення кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ. Наведені результати дозволили оцінити та спланувати можливу архітектуру створюваної радіомережі LTE в конкретних ситуаціях.

Вступ

З розвитком сімейства технологій ІМТ (International Mobile Telecommunications) удосконалюються і методи оцінки умов їх електромагнітної сумісності (ЕМС) між собою і з іншими РЕЗ, які в своїй основі мають враховувати специфічні особливості

кожної технології [1-11]. Використання радіочастот за принципом технологічної нейтральності вимагає визначення деякого узагальненого критерію ЕМС. У зарубіжній практиці в проєкті WARECS як такий критерій запропоновано використовувати крайову маску блоку ВЕМ, яка є "регуляторною" спектральною маскою в блоці спектра, що виділено оператору [7]. Рефармінг радіочастотного спектру вимагає розробки умов спільного функціонування мереж декількох стандартів у суміжних смугах частот у межах одного діапазону. Також необхідно враховувати і варіанти комбінованого використання несних частот DC / DB (Dual Carrier / Dual Band) при агрегуванні в UMTS [8, 9].

У [10] запропоновано критерій енергетичної еквівалентності для оцінки ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектру. Суть рефармінгу полягає в можливості додаткового використання раніше виділених смуг радіочастот, наприклад, GSM, іншої, більш новій технології стільникового зв'язку. В результаті такої процедури в одному частотному діапазоні можуть поєднуватися декілька технологій. Метою статті є проведення аналізу ЕМС при рефармінгу з використанням критерію енергетичної еквівалентності.

I. Критерій енергетичної еквівалентності для оцінки ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектру

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 [10]. 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 у зазначених умовах полягає в балансі енергетики, що випромінюється каналами GSM і LTE в смузі пропускання потенційно несумісного РЕЗ. Це ствердження описується математично [10], а еквівалентність енергетики завад від мереж GSM і LTE в загальному випадку має вигляд:

$$P_{T\Sigma LTE}(\Delta f_{PEZ}) \leq P_{T\Sigma GSM}(\Delta f_{PEZ}), \quad (1)$$

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

Ступінь можливого збільшення потужності потенційної завади від LTE щодо діючої завади від GSM у смузі частот $\Delta f_{\text{PEЗ}} = a \cdot m_f \Delta f_{\text{GSM}}$ описується співвідношенням [10]:

$$\eta = \frac{P_{T\Sigma\text{LTE}}(\Delta f_{\text{PEЗ}})}{P_{T\Sigma\text{GSM}}(\Delta f_{\text{PEЗ}})} = \frac{S_{\Sigma(\Delta f_{\text{PEЗ}})\text{LTE}} \cdot \Delta f_{\text{LTE}}}{S_{\text{cp}(\Delta f_{\text{PEЗ}})\text{GSM}} \cdot \Delta f_{\text{GSM}}} = \frac{P_{\text{TLTE}}}{P_{\text{TGSM}}} (1 - \beta_{\text{LTE}}) \alpha \frac{n_{\text{TLTE}} N_{\text{LTE}}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{i\text{GSM}}) n_{\text{GSM}}(f_i)}, \quad (2)$$

де $S_{\Sigma(\Delta f_{\text{PEЗ}})\text{LTE}}$ – сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС LTE, близька до рівномірної в смузі $\Delta f_{\text{PEЗ}}$;

$S_{\text{cp}(\Delta f_{\text{PEЗ}})\text{GSM}}$ – середня сумарна спектральна густина потужності випромінювання передавачів БС GSM в смузі частот $\Delta f_{\text{PEЗ}}$ (усереднена по смузі $\Delta f_{\text{PEЗ}}$);

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, $1 \leq m_f \leq \left\lfloor \frac{\Delta f_{\text{LTE}}}{\Delta f_{\text{GSM}}} \right\rfloor$, $[x]$ – ціла частина числа;

$n_{\text{TGSM}}(f_i)$ – число передавачів GSM, що випромінюють на одній завадовій ("активній") частоті f_i ;

n_{TLTE} – кількість передавачів на майданчику LTE (з урахуванням MIMO);

N_{LTE} – кількість майданчиків, на яких планується установка передавачів LTE;

β_{GSM} – показник, що враховує чинні обмеження потужності БС GSM, ($0 < \beta_{\text{GSM}} < 1$);

β_{LTE} – ступінь можливого обмеження потужності передавачів LTE за умовами ЕМС з РЕЗ ($0 < \beta_{\text{LTE}} < 1$);

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:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\Delta f_{\text{PEЗ}}}{\Delta f_{\text{LTE}}}, & \Delta f_{\text{LTE}} > \Delta f_{\text{PEЗ}}, \\ 1, & \Delta f_{\text{LTE}} \leq \Delta f_{\text{PEЗ}}. \end{cases} \quad (3)$$

Коли канал LTE Δf_{LTE} ширше смуги пропускання РЕЗ $\Delta f_{\text{PEЗ}}$, енергетика LTE потрапляє в неї частково в залежності від співвідношення цих смуг (параметра α). В іншому випадку, коли $\Delta f_{\text{LTE}} \leq \Delta f_{\text{PEЗ}}$, 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, яке має вигляд:

$$\eta = \frac{P_{TLTE}}{P_{TGSM}} (1 - \beta_{LTE}) \alpha \frac{n_{TLTE} N_{LTE}}{\sum_{i=1}^{L_f} (1 - \beta_{iGSM}) n_{GSM}(f_i)} \leq 1, \quad (4)$$

відповідно до якого сумарна потужність завади в смузі частот Δf_{PE3} від мережі LTE не перевищуватиме еквівалентну потужність завади, яка створювалась раніше в цій смузі мережею GSM.

За умови повторного використання радіочастот в мережі GSM кожен з цих передавачів знаходиться на одному з майданчиків, 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 майданчиках, коли $N_{GSM} = N_{LTE}$, маємо:

$$n_{TGSM}(f_i) = \frac{N_{GSM}}{K} = \frac{N_{LTE}}{K}. \quad (5)$$

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

$$L_f = K(l_1 + l_2 + l_3), \quad (6)$$

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

З урахуванням цього:

$$\eta = \frac{P_{TLTE}}{P_{TGSM}} (1 - \beta_{LTE}) \alpha \frac{n_{TLTE}}{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iGSM})}{K_i}} \leq 1. \quad (7)$$

Цей вираз дозволяє оцінити допустиму кількість передавачів LTE (n_{TLTE}) на одному майданчику, при якому не буде порушена енергетична еквівалентність:

$$n_{TLTE} \leq \frac{P_{TGSM}}{P_{TLTE}} \frac{\sum_{i=1}^{K(l_1+l_2+l_3)} \frac{(1 - \beta_{iGSM})}{K_i}}{(1 - \beta_{LTE})} \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Наведені співвідношення будуються на припущенні, що антени БС GSM і LTE за типом і азимуту випромінювання ідентичні. Вираз (8) 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 кожному з GSM майданчиків при плануванні секторів і конфігурації MIMO на них;
- оцінити (в разі необхідності) необхідне обмеження потужності випромінювання передавачів LTE.

II. Оцінка ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектру. Результати аналізу

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE (рис. 1).

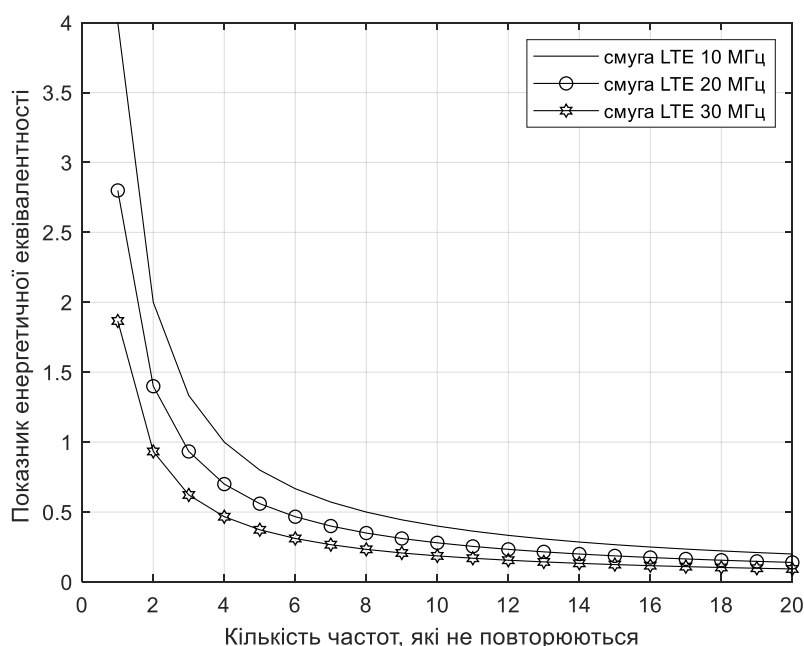


Рис. 1. Залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE

Для проведення аналізу ЕМС при рефармінгу радіочастотного спектру було взято наступні вихідні дані:

Потужності випромінювання

$$P_{LTE} = 80 \text{ Вт}, P_{TGSM} = 20 \text{ Вт};$$

показники, що враховують чинні обмеження потужності БС

$$\beta_{GSM} = 0,3; \beta_{LTE} = 0,3;$$

ширина каналу

$$\Delta f_{GSM} = 0,2 \text{ МГц}, \Delta f_{PE3} = 14 \text{ МГц};$$

$$\Delta f_{LTE} \text{ приймала значення } 10, 20 \text{ та } 30 \text{ МГц};$$

кількість передавачів

$$n_{LTE} = 12; n_{TGSM} = 12;$$

кількість майданчиків на яких планується установка передавачів LTE

$$N_{LTE} = 1;$$

кількість частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ

L_f приймала значення від 1 до 20.

На рис. 1 показано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE. Отримані залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості частот, які не повторюються. Верхня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, середня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц та нижня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц. З даних графіків видно, що для того, щоб не порушувались умови забезпечення ЕМС при смузі LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, кількість частот, які не повторюються, повинна бути не менше 4-х, тому що показник енергетичної еквівалентності повинен бути менше одиниці. При смузі LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц кількість частот, які не повторюються, повинна бути не менше 3-х. Та при смузі LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц кількість частот, які не повторюються, повинна бути не менше 2-х.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE (рис. 2).

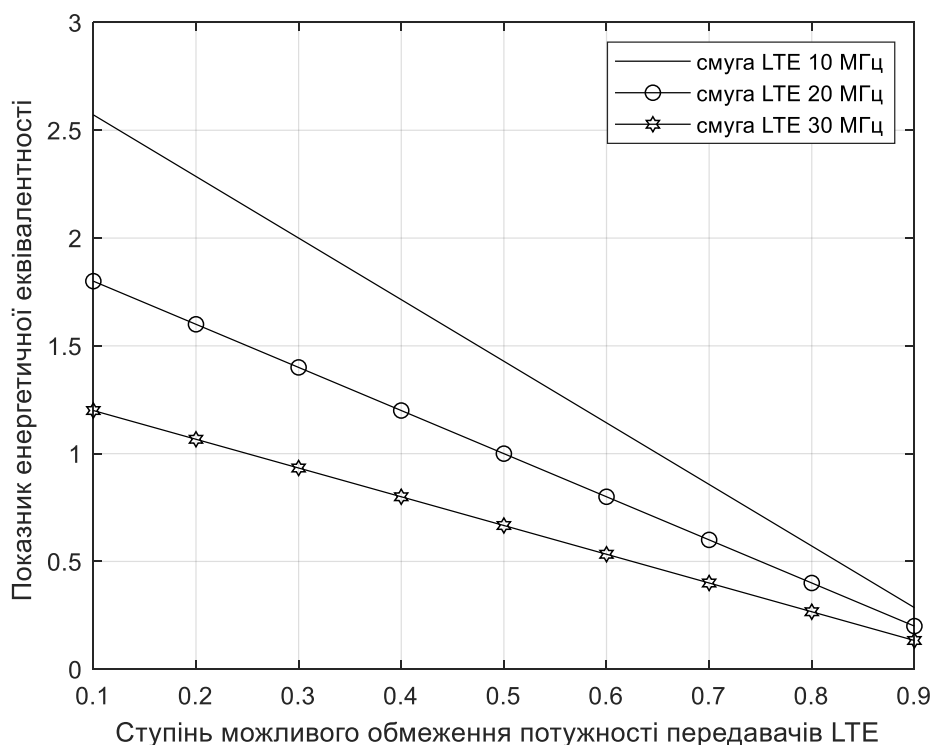


Рис. 2. Залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:
Потужності випромінювання

$$P_{LTE} = 80 \text{ Вт}, P_{TGSM} = 20 \text{ Вт};$$

показники, що враховують діючі обмеження потужності БС

$$\beta_{GSM} = 0,3; \beta_{LTE} \text{ змінювався від } 0,1 \text{ до } 0,9;$$

ширина каналу

$$\Delta f_{GSM} = 0,2 \text{ МГц}, \Delta f_{PE3} = 14 \text{ МГц};$$

$$\Delta f_{LTE} \text{ приймала значення } 10, 20 \text{ та } 30 \text{ МГц};$$

кількість передавачів

$$n_{LTE} = 12; n_{TGSM} = 12;$$

кількість майданчиків, на яких планується установка передавачів LTE

$$N_{LTE} = 1;$$

кількість частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ

$$L_f = 2.$$

На рис.2 показано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE. Отримані залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE. Верхня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, середня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц та нижня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц. З даних графіків видно, що для того, щоб не порушувались умови забезпечення ЕМС при смузі LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, ступінь обмеження потужності передавачів LTE повинен бути не менше 0,65. При смузі частот LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц ступінь обмеження потужності передавачів LTE повинен бути не менше 0,5. Та при смузі частот LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц ступінь обмеження потужності передавачів LTE повинен бути не менше 0,25.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE (рис. 3).

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:

Потужності випромінювання

$$P_{LTE} = 80 \text{ Вт}, P_{TGSM} = 20 \text{ Вт};$$

показники, що враховують чинні обмеження потужності БС

$$\beta_{GSM} = 0,3; \beta_{LTE} = 0,3;$$

ширина каналу

$$\Delta f_{GSM} = 0,2 \text{ МГц}, \Delta f_{PE3} = 14 \text{ МГц};$$

$$\Delta f_{LTE} \text{ приймала значення } 10, 20 \text{ та } 30 \text{ МГц};$$

кількість передавачів

$$n_{LTE} \text{ змінювалось від } 1 \text{ до } 20; n_{TGSM} = 12;$$

кількість майданчиків, на яких планується установка передавачів LTE

$$N_{LTE} = 1;$$

кількість частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ

$$L_f = 2.$$

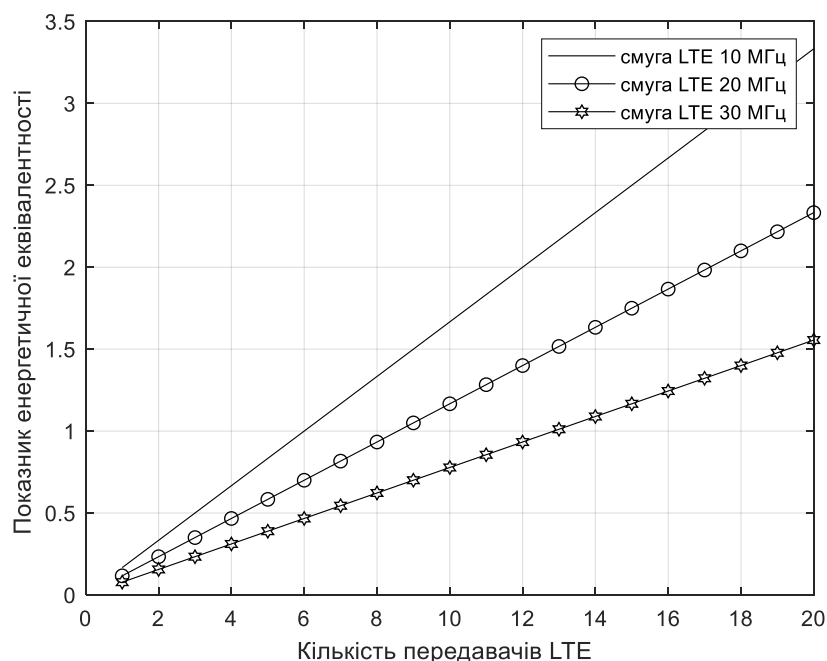


Рис. 3. Залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE

На рис. 3 показано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE. Отримані залежності показують збільшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості передавачів LTE. Верхня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, середня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц та нижня крива отримана при ширині каналу LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц. З даних графіків видно, що для того, щоб не порушувались умови забезпечення ЕМС при смузі LTE $\Delta f_{LTE} = 10$ МГц, кількість передавачів LTE повинна бути не більше 6. При смузі частот LTE $\Delta f_{LTE} = 20$ МГц кількість передавачів LTE повинна бути не більше 8. Та при смузі частот LTE $\Delta f_{LTE} = 30$ МГц кількість передавачів LTE повинна бути не більше 12.

Отримано залежності допустимої кількості передавачів LTE від смуги частот LTE при різних значеннях кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ (рис. 4).

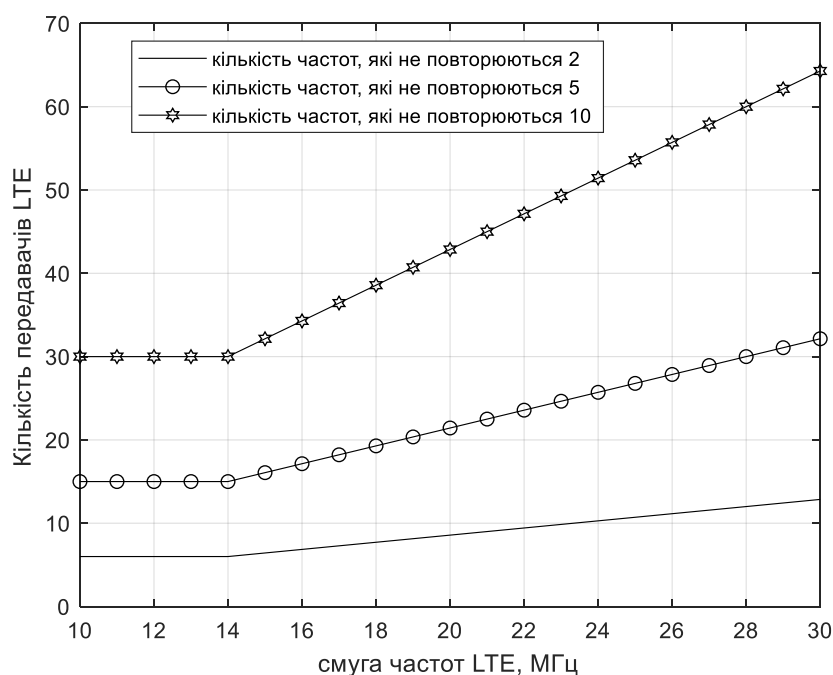


Рис. 4. Залежності допустимої кількості передавачів LTE від ширини каналу LTE

Для проведення цього експерименту було взято наступні вихідні дані:

Потужності випромінювання

$$P_{LTE} = 80 \text{ Вт}, P_{TGSM} = 20 \text{ Вт};$$

показники, що враховують чинні обмеження потужності БС

$$\beta_{GSM} = 0,3; \beta_{LTE} = 0,3;$$

ширина каналу

$$\Delta f_{GSM} = 0,2 \text{ МГц}, \Delta f_{PE3} = 14 \text{ МГц};$$

Δf_{LTE} приймала значення від 10 до 30 МГц;

кількість передавачів

$$n_{TGSM} = 12;$$

кількість майданчиків, на яких планується установка передавачів LTE

$$N_{LTE} = 1;$$

кількість частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ

L_f приймали значення 2, 5 та 10.

На рис. 4 показано залежності допустимої кількості передавачів LTE від ширини каналу LTE при різних значеннях кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ.

Судячи з отриманих залежностей можна зробити висновок про те, що при збільшенні ширини каналу LTE від 10 до 14 МГц допустима кількість передавачів LTE не змінюється, тому що параметр α , який показує, наскільки смуга РЕЗ більше (менше) смуги LTE не змінюється. При досягненні смуги частот LTE 14 МГц і при подальшому її зростанні допустима кількість передавачів LTE збільшується. Збіль-

шується також допустима кількість передавачів при збільшенні кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ. Таким чином, збільшити допустиму кількість передавачів LTE та дотриматись умов ЕМС можна за рахунок збільшення ширини каналу LTE та за рахунок збільшення кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ.

Висновки

Проаналізовано критерій енергетичної еквівалентності, який запропоновано використовувати при рефармінгу радіочастотного спектру. Проведений аналіз дозволяє визначити умови збереження енергетичної еквівалентності мережі GSM у смузі частот відповідної ширини, що планується для створення мережі LTE при рефармінгу, а саме:

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

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ при різних значеннях ширини каналу LTE. Отримані залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості частот, які не повторюються.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE. Ці залежності показують зменшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні ступеня можливого обмеження потужності передавачів LTE.

Отримано залежності показника енергетичної еквівалентності від кількості передавачів LTE при різних значеннях ширини каналу LTE, які показують збільшення показника енергетичної еквівалентності при збільшенні кількості передавачів LTE.

Отримано залежності допустимої кількості передавачів LTE від ширини каналу LTE при різних значеннях кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ. Аналіз показав, що збільшити допустиму кількість передавачів LTE та дотриматись умов ЕМС можна за рахунок збільшення ширини каналу LTE та за рахунок збільшення кількості частот, які не повторюються в смузі приймача РЕЗ.

Наведені результати дозволяють оцінити і спланувати можливу архітектуру створюваної радіомережі LTE в конкретних ситуаціях. Наприклад, якщо для якихось умов розрахована допустима кількість передавачів на майданчику LTE виявиться недостатньою, збільшити її можна за рахунок деякого зменшення (обмеження) потужності випромінювання цих передавачів, зберігаючи при цьому енергетичну еквівалентність.

Список літератури:

1. Гельгор А.Л., Попов Е.А. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 204 с.
2. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. М.: Эко-Трендз, 2010. 284 с.
3. Москалец Н.В., Наорс Анад И. Повышение эффективности использования радиочастотного ресурса при внедрении систем широкополосного беспроводного доступа WiMAX. Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. Вып.155. С. 186–190.
4. Москалец Н.В., Селиванов К.А., Наорс Анад И. Анализ энергетических параметров системы WiMAX. Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. Вып. 159. С. 143–147.
5. Москалец Н.В., Наорс Анад И. Анализ влияния интерференции на уровень принимаемого сигнала в системе WiMAX. Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2010. Вып. 163. С. 112–117.
6. Москалец Н.В., Василенко Ю.А. Анализ характеристик систем широкополосного беспроводного доступа 4G. Науково-технічна конференція Академії внутрішніх військ МВС України «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку», м. Харків, 2012р. С.12-13.
7. 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 WARECS. Electronic Communications Committee (ECC). 2008.
8. Скрынников В.Г. Радиоподсистемы UMTS/LTE. Теория и практика/ В.Г. Скрынников/ Спорт и Культура-2000. М.: 2012. 865 с.
9. Скрынников В.Г. Обобщенный критерий по ЭМС при рефарминге диапазона частот GSM900 для UMTS. Тез. науч.-техн. секций IX международной отраслевой научно-практической конференции "Технологии информационного общества". Москва. 2015. С. 68.
10. Скрынников В.Г. Новый критерий для оценки условий ЭМС при рефарминге радиочастотного спектра. Ежемесячный научный журнал Международного союза ученых "Наука. Технологии. Производство". 2015. № 3 (7). С. 45-58.
11. Скрынников В.Г. Повышение скорости передачи данных в сетях UMTS/HSPA+ на основе минимизации внутрисистемных помех. Электросвязь. 2013. № 7. С. 37-40.