

Н. О. Ліщиновська

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

## МОЖЛИВІСТЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМИ EGNOS RIMS НА ОСНОВІ РЕЗОНАТОРІВ НА НЕРЕГУЛЯРНИХ ЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧ

**Анотація:** Предметом вивчення в статті є процеси в коливальних системах на базі мікросмужкових і симетричних смужкових ліній передач. Метою статті є розробка ефективних засобів усунення перешкод, які формуються супутниковим радіонавігаційним системам, що забезпечать можливість функціонування апаратури системи EGNOS RIMS в Україні. Задача, що вирішується – обґрунтування технічних рішень та аналіз радіочастотного середовища, як ключового критерія вибору місця розташування системи EGNOS RIMS в Україні та впливу радіочастотного середовища на продуктивність системи. В статті розглядається: наявні в зоні розгортання системи джерела перешкод, що негативно впливають на характеристики приймача EGNOS RIMS, оскільки їх потужність перевищує необхідний рівень у використаних діапазонах частот GPS L1 та L2. Особливості синтезу резонаторів на замкнутих і розімкнутих відрізках мікросмужкових і симетричних смужкових ліній передачі, для усунення перешкод, які формуються супутниковими радіонавігаційними системами. Перспективні шляхи застосування запропонованих резонаторів у використаних діапазонах частот GPS L1 та L2. Висновки: запропоновані технічні рішення доцільно використовувати для усунення перешкод, які формуються в супутникових радіонавігаційних системах, що забезпечують можливість функціонування апаратури системи EGNOS RIMS в Україні.

**Ключові слова:** EGNOS, RIMS, GPS, L1, L2 резонатор, мікросмужкові та симетричні смужкові лінії передачі.

### Вступ

Співпраця України та ЄС в рамках проекту EGNOS RIMS бере початок з грудня 2005 року, коли було підписано угоду про співпрацю в проєкті європейської ГНСС EGNOS / Galileo в Києві. Україна ратифікувала угоду в 2007 році, ЄС - восени 2013 року. Підписання даного договору свідчили про наміри, щодо розширення покриття системи EGNOS RIMS на території України та здійснення в рамках виконання Угоди про асоціацію між Україною та ЄС (Розділ 8 "Космос") [1].

Заходи, щодо розширення навігаційного покриття EGNOS RIMS на території України здійснюються в рамках виконання Згоди про асоціацію між Україною та Європейським союзом.

Практична підготовка до розміщення в Україні контрольно-коригуючої станції RIMS (Ranging and Integrity Monitoring Stations) для прийняття сигналів від європейської Galileo почалась в 2015 році [2].

Впровадження системи EGNOS RIMS в Україні значно поліпшує якість місцевизначень навігаційних приймачів та стане ключовим фактором для підвищення рівня безпеки та ефективності авіаційного та інших видів транспорту, у тому числі, і для військових перевезень, а також сприятиме розвитку виробничих потужностей в ключових галузях економіки.

У відповідності з частиною третьою статті 6 Угоди про співробітництво щодо цивільної глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) між Європейським Співтовариством, його державами-членами та Україною від 01.12.2005 сторонами Угоди було визнано «...важливість захисту навігаційного спектру радіочастот від порушень та перешкод» [3]. «GNSS» або «глобальна навігаційна супутникова система» – це інфраструктура, що складається з групи супутників та мережі центрів і наземних станцій, яка надсилає радіо сигнали для забез-

печення послуги надточного вимірювання часу та позиціонування над всією землею поверхнею користувачам з відповідним приймачем [3, 4].

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) – регіональна система супутникової навігації, що коригує відкриті сигнали, надіслані глобальними системами супутникової навігації, головним чином GPS і Galileo, що дозволяє користувачам цих систем отримувати кращі результати точності та цілісності. EGNOS включає ряд наземних станцій та кілька транспондерів, встановлених на геостационарних супутниках. Наземні станції складаються з інженерного центра, центрів управління місіями, станцій RIMS, станцій NLES, сервісного центра та сервера [3, 4].

На теперішній час зона дії системи охоплює практично всю Європу, включаючи не велику частину західної території України. Розширення EGNOS це розширення відкритих та життєво важливих послуг EGNOS на інших територіях за межами території Союзу, шляхом розширення наземної інфраструктури, а саме мережі станцій RIMS в інтересах країн, що не є членами Союзу [3, 4]. Що стосується зон покриття EGNOS то це області, в яких можна приймати сигнали, надіслані системою EGNOS, які відповідають мінімальним параметрам доступності, визначеним для відкритої послуги. Наземні станції RIMS, що належать до системи EGNOS, призначені для збору в режимі реального часу даних про позиціонування з сигналів глобальних супутникових навігаційних систем [3, 4].

### Стан питання

У 2018 році міжнародний аеропорт "Київ" (Жуляни) було обрано переможцем в розташуванні контрольно-коригуючих станцій EGNOS RIMS відповідно до угоди про розширення та співробітництво щодо цивільної глобальної навігаційної супутни-

кової системи (ГНСС) між Європейським Співтовариством, його державами-членами та Україною. Таке рішення було ухвалено завдяки підтримці Державного космічного агентства України, Європейського агентства ГНСС (GSA) та представників Європейської комісії.

Одним із ключових критеріїв вибору місця є радіочастотне середовище тобто захист навігаційного спектру радіочастот від перешкод, оскільки умови навколишнього середовища мають безпосередній негативний вплив на продуктивність системи EGNOS RIMS. У той же час, в ході досліджень в районі міжнародного аеропорту «Київ» (Жуляни) було виявлено джерела перешкод, потужність яких перевищує допустимий рівень, оскільки ці перешкоди негативно впливають на характеристики приймача станції RIMS у використовуваних діапазонах частот L1 та L2 (з центральними частотами 1575,42 МГц та 1227,6 МГц). Крім того, ці перешкоди є безперервними, що призводить до значного порушення вимог по розміщенню станції RIMS [5 – 7].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день, під час проектування радіоелектронних засобів (РЕЗ) питання електромагнітної сумісності (ЕМС) недостатньо вирішені [8]. Виходячи із значної кількості відомих методів та способів їх реалізації в конкретних РЕЗ, їх ефективність за різними критеріями оцінки оцінена не більше 20 %. Слабо враховані питання впливу окремих способів поліпшення технічних характеристик РЕЗ в широкій смузі частот на зміну основних функціональних характеристик РЕЗ і питання комплексування різних способів для досягнення необхідних рівнів характеристик випромінювань й прийому РЕЗ, що впливають на їх ЕМС. Таким чином, одним з основних факторів, що впливають на ЕМС РЕЗ, є взаємні перешкоди, що створюються основними і неосновними випромінюваннями РЕЗ. До основних особливостей електромагнітної обстановки при роботі РЕЗ на борту повітряного судна (ПС) можна віднести таке [9]: в межах одного ПС зосереджена велика кількість РЕЗ різного призначення, що мають спільні джерела живлення, загальні або близько розташовані антенні системи, конструктивні і функціональні зв'язки; можливість впливу випромінювань станцій активних перешкод свого літака і сусідніх літаків бойового порядку на інші літакові РЕЗ; одночасна робота однотипних РЕЗ на літаках в загальному порядку; наявність загальних частотних діапазонів РЕЗ, що міститься у літаках різного призначення; вплив на бортове радіоелектронне обладнання (РЕО) численних перешкод від наземних РЕЗ при вході в їх зону дії.

Основними причинами виникнення взаємних перешкод для бортових РЕЗ є [10]: робота на близьких або співпадаючих частотах; недостатній територіальний рознос; відсутність синхронного запуску роботи РЕЗ.

Основні напрямки забезпечення ЕМС РЕЗ [11]: підвищення ефективності використання та регламентації частотного спектра (розробка перспективного плану і проведення поточного планування радіочас-

тотного діапазону, опрацювання технічних шляхів економного використання радіочастотного спектру, а також освоєння та регламентація нових діапазонів хвиль); поліпшення технічних характеристик РЕЗ в широкій смузі частот в результаті рішення трьох взаємозалежних завдань по нормуванню параметрів технічних характеристик; реалізації методів поліпшення технічних характеристик; метрологічного забезпечення вимірювань і контролю характеристик.

Рішення завдання щодо нормування технічних характеристик РЕЗ здійснюється відповідно до програм комплексної стандартизації, встановлюють норми на побічне випромінювання і прийом по побічним каналам. Аналіз роботи РЕЗ на борту ПС показав наявність великої кількості потенційно несумісних РЕЗ [8]. Великі резерви поліпшення електромагнітної обстановки на борту ПС приховані в реалізації методів поліпшення технічних характеристик РЕО, і в першу чергу в удосконаленні методів синтезу спеціальних виборчих пристроїв частотної селекції. При їх розробці виникає ряд труднощів, пов'язаних з суперечливими вимогами до фільтруючих систем:

- отримання частотних характеристик фільтрів з високою вибірковістю у разі технологічного серійного виробництва і мінімальних малогабаритних показників;

- отримання необхідної широти смуги загородження при заданих рівнях загасання в смузі пропускання і смузі загородження [9].

**Мета статті.** З урахуванням зазначених умов, актуальним на сьогодні є завдання щодо розробки ефективних засобів усунення перешкод, які формуються супутниковим радіонавігаційним системами, що забезпечать можливість функціонування апаратури системи EGNOS RIMS в Україні.

### Основна частина

У пристроях радіотехніки широко застосовуються коливальні системи на базі мікросмужкових і симетричних смужкових ліній. В даній роботі розглянуті особливості синтезу резонаторів на замкнутих і розімкнених відрізках вищевказаних конструкцій ліній передачі для функціонування апаратури системи EGNOS RIMS [12].

Таким чином оскільки лінія є замкнутою, то в залежності від її довжини змінюється характер вхідного опору і частотні характеристики лінії стають аналогічними характеристиками відповідно послідовного або паралельного коливального контуру, а сама лінія стає еквівалентною послідовному або паралельному коливальному контуру поблизу резонансної частоти. Полюси вхідного опору короткозамкненою лінії слідує з періодом  $\pi/t_3$ , так як вхідний опір однорідної (регулярної) замкнутої лінії [13]  $Z_{kz} = jWtg\omega t_3$ . Закон зміни хвильового опору, що забезпечує максимальну добротність резонатора досягається за рахунок певного закону зміни ширини провідної смужки. Ширину смужки  $i$ -ої сходинки відрізка регулярної лінії  $W_i$  з хвильовим опором  $W(\tau)$  визначається виразом:

$$W = 8h / (e^d - 2e^{-a}), \quad (1)$$

де  $h$  – товщина діелектричної підкладки в мм;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність підкладки;  $w$  – ширина провідної смужки в мм.

При цьому похибка обчислень за формулою (1) не перевищує 1 %, що цілком задовольняє вимогам, що пред'являються до інженерних розрахунків.

Наведені формули були отримані в припущенні, що товщина провідної смужки нескінченно мала. Однак в тих випадках, коли  $b/h > 0 < 0,06$ , де  $b$  – товщина провідної смужки, необхідно враховувати товщину смужки. Для цього ширину смужки  $w$ , розраховану за умови, що її товщина дорівнює нулю, необхідно зменшити на величину, значення якої обчислюються таким чином:

$$\text{при } w/h \leq 0,16 \quad \Delta w = b [1 + \ln(4\pi w/b)] / \pi, \quad (2)$$

$$\text{при } w/h > 0,16 \quad \Delta w = b [1 + \ln(2\pi w/b)] / \pi. \quad (3)$$

Цей вираз справедливо, коли товщина смужки в кілька разів (але не більше) перевищує глибину скіншару в металі. Довжина провідної смужки, відповідної  $i$ -ї сходинки  $\Delta l_i = \Delta l_i' + \Delta l_i''$ , де  $\Delta l_i'$ ,  $\Delta l_i''$  – довжини відрізків однорідних ліній передачі, відповідних  $i$ -х сходинок.

Розглянуті вище вирази для розрахунку геометричних розмірів мікросмужкових ліній виведені за умови, що в лінії поширюється тільки ТЕМ-хвиля, тобто відсутні поздовжні складові векторів напруженості електричного і магнітного поля. Фазова швидкість ТЕМ-хвилі не залежить від частоти.

Насправді всі зазначені явища в різному ступені проявляються в реальній мікросмужковій лінії. Особливо в мікросмужковій лінії позначаються втрати на випромінювання в площині, перпендикулярній площині смужки, що знижує добротність резонатора.

Також, але в набагато меншому ступені випромінює замкнутий кінець резонатора через спотворення структури поля в кінці лінії в місці короткого замикання.

У мікросмужковій лінії не всі силові лінії поля між смужковим провідником і заземленою пластини проходять через підкладку. Тому хвиля, що розповсюджується вздовж мікросмужкового провідника, є не чисто Т-хвилею. Вона є квазі-Т-хвилею. Її фазова швидкість в мікросмужковій лінії визначається формулою [14]:

$$V_{\phi} = C / \epsilon_{re}. \quad (4)$$

Відзначимо, що ефективна діелектрична постійна  $\epsilon_{re}$  менше діелектричної постійної підкладки, так як ефективна діелектрична постійна враховує поле поза підкладки. Втрати в мікросмужковій лінії складаються з втрат у провіднику і діелектрику. Зокрема, формула для обчислення загасання в провіднику провідної смужки  $\alpha_{np}$  (дБ/м) може бути записана у вигляді [15]:

$$\alpha_{np} = 1,38 A \frac{R_s}{h W_0} \cdot \frac{32 - (w_e/h)^2}{32 + (w_e/h)^2}, \quad \left(\frac{w}{h}\right) < 1, \quad (5)$$

$$\alpha_{np} = 6,1 \cdot 10^{-5} A \frac{R_s w_e \epsilon_r}{h} \left( w_e/h + \frac{0,667 w_e/h}{w_e/h + 1,444} \right), \quad (6)$$

Резонатори у вигляді розімкнутих відрізків однорідних полоскових ліній застосовуються в якості прохідних, що практично виключає випромінювання з відкритого кінця відрізка. Так як лінія є розімкнутою, то чергування полюсів в ній відбувається з періодом  $k\pi/2$ , оскільки вхідний опір відрізка лінії  $Z_{xx} = W \text{cthpt}_3$ . Залежно від характеру навантаження, підключеної до кінця лінії при паралельному включенні резонатора, довжина її буде зменшуватися або збільшуватися для створення режиму стоячих хвиль. При  $W_0 > R_H$ ,  $W_0 < R_H$ , ( $R_H$  – опір навантаження) і, якщо лінія навантажена на комплексний опір, то в ній виникає режим змішаних хвиль.

Недоліком симетричної полоскової лінії є ускладнений доступ до внутрішнього провідника при монтажі схеми в корпус, а також ускладнена установка навісних елементів, які можуть застосовуватися для настройки, перебудови, регулювання характеристик резонатора [13].

При виконанні резонатора на діелектричній підкладці з високою діелектричною проникністю, загасанням за рахунок випромінювання можна знехтувати враховуючи його малість. Підвищення добротності полоскової лінії можливо за рахунок збільшення відстані між пластинами і шириною смужки, однак існує межа, обумовлена появою хвильоводних типів коливань. Тому фізичними обмеженнями є напівхвильовий розмір ширини токонесущої смужки і відстані між нею і заземлюючою пластинкою. При невиконанні цієї вимоги уздовж резонатора починають поширюватися вищі типи коливань, що робить його практично марним. Що стосується розімкнутих резонаторів, то необхідно відзначити, що при малих електричних довжинах пристроїв з відкритим кінцем лінії, втрати на випромінювання можуть становити до 90 % від загального числа втрат. У наявності невідповідність між вимогами до комплексної мікромініатюризації і втратами в резонаторах. Таким чином доцільно резонатор з відкритим кінцем використовувати як прохідний [16].

Зі збільшенням перепаду хвильового опору поліпшуються фільтруючі властивості резонатора і зменшується його довжина. Останнє означає, що зростають втрати на випромінювання з відкритого кінця лінії. Отже, при накладенні обмежень на мінімальне і максимальне значення хвильового опору, що задається з урахуванням фізичної можливості бути реалізованим, необхідно враховувати і фактор зростання втрат на випромінювання зі зменшенням довжини відрізка лінії.

Запропоновані в роботі фільтри були промодельовані в середовищі МATHCAD для супутникових радіонавігаційних систем в діапазоні частот L2 (з центральною частотою 1227,6 МГц) (рис. 1).

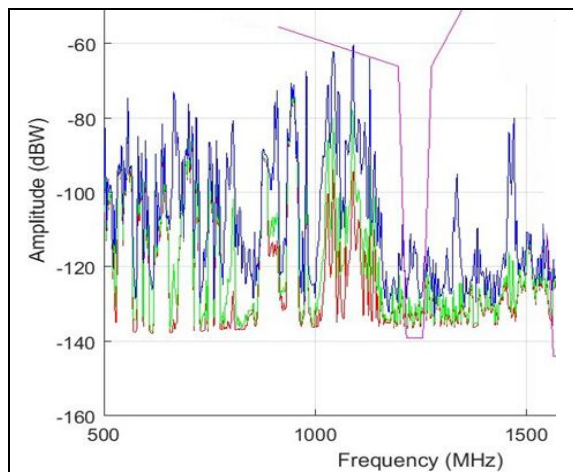


Рис. 1. Фільтрація в діапазоні частот L2

Аналіз графіку залежності подавлення сигналу від частоти показує, що застосування запропонованих резонаторів є ефективним для усунення перешкод, які формуються супутниковим радіонавіга-

ційним системами, що забезпечать можливість функціонування апаратури системи EGNOS в Україні.

### Висновки

У статті розглянуто питання вирішення проблеми завадостійкості обладнання систем EGNOS RIMS, що запроваджуються в Україні.

Для усунення перешкод, що формуються супутниковим радіонавігаційним системам в діапазоні частот L1 та L2 (з центральними частотами 1575,42 МГц та 1227,6 МГц), запропоновано конструювати фільтри на основі резонаторів на нерегулярних лініях переді.

Використання резонатора на діелектричній підкладці з високою діелектричною проникністю дозволяє захистити навігаційний спектр радіочастот від перешкод.

Представлене технічне рішення дозволяє здійснити розширення EGNOS в Україні у відповідності до міжнародної угоди, а саме в міжнародному аеропорту «Київ» (Жуляни).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://space.com.ua/2019/04/11/interv-yu-gazeti-den-z-golovoyu-derzhavnogo-kosmichnogo-agentstva-ukrayini-pavlo-m-degtvarenkom/>
2. <https://ua.interfax.com.ua/news/economic/522218.html>
3. <https://nikcenter.org/newsItem/45512>
4. <https://www.gpsworld.com/upgrades-to-monitoring-stations-support-egnos/>
5. <https://spacecenter.gov.ua/bez-rubriki/vikoristannya-sistem-egnos-galileo-v-ukrayini.html>
6. <https://ru.wikipedia.org/wiki/EGNOS>
7. <https://aggeek.net/ru-blog/v-ukraine-razmestyat-pervuyu-stantsiyu-egnos>
8. Іванов В.О., Сібрук Л.В., Куленко О.В. Умови забезпечення електромагнітної сумісності у групуванні радіоелектронних систем. Електроніка та системи управління, 2009. № 1 (19). С. 76 – 81.
9. Іванов В.О., Решетник М.В., Бондаренко Д.П. Алгоритм розрахунку норм частотно-територіального рознесення радіоелектронних засобів. Вісник ДУІКТ, 2007. № 5 (3). С. 262–270.
10. Дементьев А.Н., Нефедов В.И., Трефилов Н.А., Блудов А.А. Помехозащищенность спутниковых систем связи и навигации с многолучевыми активными ФАР. Вопросы радиоэлектроники, 2016. № 11. С. 6–12.
11. M. Nakamura et al., “Development status of the world’s GNSSs and the trend of the satellite positioning utilization”, Special issue of this NICT Journal, 2010, 5-1.
12. Приходько Т.Ю., Бойко Ю.П., Лициновская Н.О. Построение СВЧ фильтрующих устройств. Вестник Инженерной академии Украины, 2017. № 3. С. 200 – 208.
13. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ ПУ / Под ред В.И. Вольмана. Радио и связь, 1982. 328 с.
14. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: URSS, 2014. 544 с.
15. Gupta K.C. Analysis and Design of Planar Microwave Components. Institute of Electrical and Electronic Eng., 2002. 586 p.
16. Приходько Т.Ю., Мищенко А.В., Лициновская Н.А. Добротность резонатора на основе нерегулярной линии передачи. Вестник Инженерной академии Украины, 2017. № 4. С. 97 – 102.

Received (Надійшла) 18.06.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.08.2020

### Capability to provide noise immunity of egnos rims system equipment based on resonators on irregular transmission lines

N. Lishchynovska

**Abstract:** The subject of study in the article are the processes in oscillatory systems based on microstrip and symmetric strip transmission lines. The aim of the article is to develop effective means of eliminating interference generated by satellite radio navigation systems, which will ensure the possibility of functioning of the equipment of the EGNOS RIMS system in Ukraine. The problem to be solved is substantiation of technical solutions and analysis of the radio frequency environment as a key criterion for choosing the location of the EGNOS RIMS system in Ukraine and the impact of the radio frequency environment on the system performance. The article considers: there are interference sources in the deployment zone of the system, which negatively affect the characteristics of the EGNOS RIMS receiver, as their power exceeds the required level in the used GPS frequency bands L1 and L2. Features of resonator synthesis on closed and open segments of microstrip and symmetric strip transmission lines, to eliminate interference generated by satellite radio navigation systems. Promising ways of application of the offered resonators in the used frequency ranges of GPS L1 and L2. Conclusions: the proposed technical solutions should be used to eliminate obstacles that are formed in satellite radio navigation systems, providing the possibility of operation of the equipment of the EGNOS RIMS system in Ukraine.

**Keywords:** EGNOS, RIMS, GPS, L1, L2 resonator, microstrip transmission lines, symmetric strip transmission lines