

УДК 621.391.8+621.396.96

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.3\(39\).64-74](https://doi.org/1034169/2414-0651.2023.3(39).64-74)

С. Д. ЗІБІН, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

А. О. ПОПОВ, кандидат технічних наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Л. В. БІЛОБОРДОВА
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ З БОРТОВИМИ РАДІОЕЛЕКТРОННИМИ ЗАСОБАМИ ЗВ'ЯЗКУ ТА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ АВІАЦІЇ

Стверджується, що для обґрунтування технічних вимог до наземних засобів радіоелектронної боротьби з бортовими радіоелектронними засобами авіації слід мати такі моделі: просторово-енергетичну модель радіоелектронної боротьби з бортовими радіоелектронними засобами ультракороткохвильового зв'язку авіації та просторово-енергетичну модель радіоелектронної боротьби з телекомунікаційною системою управління авіацією. Наводиться стислий опис моделей у табличній формі. Зазначається, що наведені моделі радіоелектронної боротьби є основою для обґрунтування основних технічних вимог до наземних засобів радіоелектронної боротьби, а також вимог з радіоелектронного захисту бортових радіоелектронних засобів зв'язку та передачі інформації авіації, які функціонують в умовах радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: модель радіоелектронної боротьби, автоматизована станція перешкод, телекомунікаційна система управління авіацією, бортовий радіоелектронний засіб ультракороткохвильового зв'язку, бортовий радіоелектронний засіб передачі інформації, наземний/повітряний пункт управління авіацією, зона радіоелектронного подавлення, співвідношення «сигнал – шум», співвідношення «сигнал – перешкода».

ВСТУП

В сучасних умовах розвиток та застосування озброєння та військової техніки супроводжується вирішенням завдань виявлення об'єктів ураження, передачі інформації, а також управління зброєю, насамперед, високоточною (ВТЗ), в тому числі ВТЗ повітряного базування. Досвід воєнних конфліктів останніх десятиріч переконливо свідчить про високу ефективність ВТЗ, яка дозволяє оперативно здійснювати ураження відповідних цілей в усіх сферах ведення воєнних дій. Зниження ефективності застосування ВТЗ можливо за рахунок спеціально організованого впливу на інформаційні канали управління ВТЗ та носіями цієї зброї шляхом радіоелектронного подавлення (РЕП) відповідних радіоелектронних засобів (РЕЗ). Для вирішення цих завдань застосовуються засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ), які забезпечують РЕП каналів передачі інформації та управління шляхом створення достатньо потужних перешкод, частотно-часові характеристики яких повинні бути оптимальними для конкретних сигналів РЕЗ, які підлягають РЕП. В бойових діях повітряних сил засоби РЕБ застосовуються в основному для РЕП систем управління авіацією противника, захисту своєї авіації та об'єктів повітряних сил від ураження ВТЗ.

Для обґрунтування технічних вимог до засобів РЕП бортових РЕЗ зв'язку та передачі інформації авіації в ході їх розробки, необхідно мати моделі РЕБ з такими бортовими РЕЗ. З іншого боку, для обґрунтування технічних вимог з радіоелектронного захисту бортових РЕЗ зв'язку та передачі інформації авіації також слід мати такі моделі РЕБ. Ці моделі повинні містити просторово-енергетичні моделі РЕБ з бортовими РЕЗ ультракороткохвильового (УКХ) зв'язку та бортовими РЕЗ передачі інформації, які функціонують в умовах впливу спеціально організованих перешкод.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз стану розвитку наземних засобів РЕП та їх можливостей розглянуто в роботах [1–5]. Деякі часткові підходи до оцінки впливу спеціально організованих перешкод на функціонування РЕЗ зв'язку та передачі інформації розглядаються в роботах [6–12]. Загальні питання моделювання та симуляції РЕП сучасних РЕЗ представлені в роботах [13–15]. Алгоритми функціонування РЕЗ зв'язку та передачі інформації розглянуті в роботах [16–18]. Питанням створення моделей функціонування РЕЗ зв'язку та передачі інформації в умовах РЕП присвячені роботи [19–22].

Метою роботи є, по-перше, постановка та вирішення завдання створення моделей РЕБ з бортовими РЕЗ зв'язку та передачі інформації в умовах РЕП з боку наземних засобів РЕБ з урахуванням особливостей їх антенних систем для подальшого формулювання основних технічних вимог до перспективних наземних засобів РЕП бортових РЕЗ зв'язку та передачі інформації, а по-друге, визначення методологічних основ для обґрунтування вимог з радіоелектронного захисту бортових РЕЗ зв'язку та передачі інформації авіації.

РОЗРОБКА ПРОСТОРОВО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕБ З БОРТОВИМИ РЕЗ УКХ ЗВ'ЯЗКУ АВІАЦІЇ

Просторово-енергетична модель РЕБ з бортовими РЕЗ УКХ зв'язку авіації, яка розглядається, передбачає такі обмеження:

- 1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антен бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації;
- 2) перешкода є прицільною по центральній частоті спектру корисного сигналу бортового РЕЗ, що подається, тобто спектр сигналу та спектральна щільність потужності перешкоди співпадають за інтервалом частот;
- 3) координати наземного засобу РЕП ($x_{\text{РЕП}}, y_{\text{РЕП}}$) обираються в початку координат: $(x_{\text{РЕП}}, y_{\text{РЕП}}) = (0, 0)$, а координати РЕЗ ($x_{\text{РЕЗ}}, y_{\text{РЕЗ}}$) наземного пункту управління (НПУ) авіацією обираються таким чином, що $x_{\text{РЕЗ}} = 0$, а $y_{\text{РЕЗ}} = d$, де d – відстань між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації;
- 4) візуалізація зон РЕП/зон відсутності РЕП здійснюється у вертикальній площині;
- 5) побудова зон РЕП/зон відсутності РЕП на основі моделі може здійснюватись як для аналогових, так й для цифрових РЕЗ УКХ зв'язку;
- 6) вихідними даними для побудови просторово-енергетичної моделі радіоелектронної боротьби з бортовими РЕЗ зв'язку та передачі інформації є: потужність передавача перешкод наземного засобу РЕП P_j та потужність передавача P РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації; коефіцієнт подавлення [6]; відстань d між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації; діаграма спрямованості $G_j(\beta, \varepsilon)$ антенної системи засобу РЕП в азимутальній та кутомірній площинах відповідно.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ УКХ зв'язку авіації при постановці перешкод наземними засобами РЕП наведена в табл. 1.

Для пояснення методики побудови просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ УКХ зв'язку авіації при постановці перешкод наземними засобами РЕП та побудови зон РЕП/зон відсутності РЕП скористаємось

Таблиця 1

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації в умовах впливу перешкод з боку наземних засобів РЕП
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з однієї наземної автоматизованої станції перешкод (АСП), яка здійснює РЕП бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (1)... (4), які дозволяють побудувати зони РЕП. Обмеження, що застосовуються, наведені вище.

основними геометричними співвідношеннями між 1) засобом РЕП; 2) РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації; 3) бортовим РЕЗ УКХ зв'язку літака (вертольоту), що здійснює прийом інформації, які показані на рис. 1. Межа зон РЕП/зон відсутності РЕП визначається тотожністю щільностей потоків потужності перешкодового та корисного сигналів в точці прийому з урахуванням необхідного коефіцієнту подавлення K_n [6]:

$$\frac{P_j \cdot G_j(\beta, \varepsilon) \cdot G_0(\beta, \varepsilon) \cdot v}{R^2(t)} = \frac{P \cdot G(\beta, \varepsilon) \cdot G_0(\beta, \varepsilon) \cdot K_n}{r^2(t)}, \quad (1)$$

де P_j – потужність передавача перешкод засобу РЕП; P – потужність передавача РЕЗ, що здійснює передачу інформації; $K_n = (P_n / P_s)_{\min}$ – коефіцієнт подавлення приймача РЕЗ, P_n, P_s – потужності перешкоди та сигналу на вході приймача бортового РЕЗ, що подається, відповідно; d – відстань між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації; $R(t)$ – відстань між засобом РЕП та бортовим РЕЗ, що здійснює прийом інформації; $r(t)$ – відстань між бортовим РЕЗ, що здійснює прийом інформації, та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації; $G_j(\beta, \varepsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи засобу РЕП в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; v – коефіцієнт, який враховує неспівпадіння поляризації сигналу перешкоди та сигналу РЕЗ НПУ; $G(\beta, \varepsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; $G_0(\beta, \varepsilon)$ – діаграма спрямованості антени бортового РЕЗ УКХ зв'язку, що здійснює прийом інформації; $x(t), y(t)$ – координати бортового РЕЗ, що здійснює прийом інформації; t – параметр, який визначає параметричне завдання кривих.

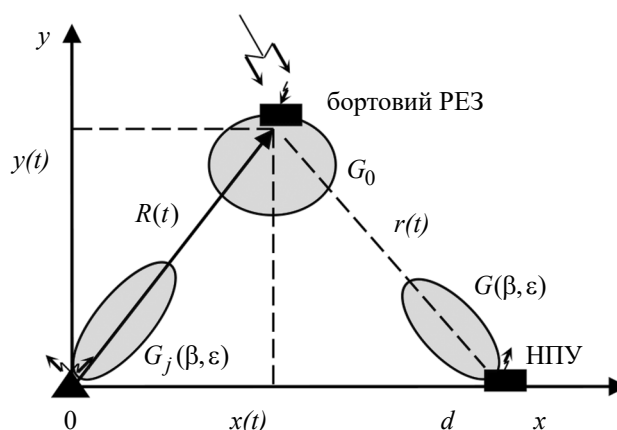


Рис. 1. Основні просторові співвідношення між засобом РЕП, бортовим РЕЗ та НПУ

При цьому вважатимемо, що $G_0(\beta, \varepsilon) = G_0 = 1$, оскільки відповідно до обмеження 1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антен бортових РЕЗ УКХ зв'язку, які подаються.

З тотожності (1) випливає квадратне рівняння:

$$a(t)R^2(t) + b(t)R(t) + c(t) = 0, \quad (2)$$

де $a(t) = 1 - B^2(t)$; $b(t) = 2dB^2(t) \cos(t)$; $c(t) = -d^2 B^2(t)$;

$$B(t) = \sqrt{\frac{P_j \cdot G_j(\beta, \varepsilon) \cdot \nu}{P \cdot G(\beta, \varepsilon) \cdot K_n}}.$$

Квадратичне рівняння (2) має два коріння, які визначають його розв'язок:

$$R_1(t) = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2a(t)} (-b(t) + \sqrt{b^2(t) - 4a(t)c(t)}) \right]; \quad (3a)$$

$$R_2(t) = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2a(t)} (-b(t) - \sqrt{b^2(t) - 4a(t)c(t)}) \right]. \quad (3b)$$

Коріння (3 а, б) рівняння (2) визначає дві криві, які характеризують зони РЕП/зони відсутності РЕП, та в параметричній формі запису мають відповідний вигляд:

$$x_1(t) = R_1(t) \cos(t), \quad y_1(t) = R_1(t) \sin(t); \quad (4a)$$

$$x_2(t) = R_2(t) \cos(t), \quad y_2(t) = R_2(t) \sin(t). \quad (4b)$$

Зони РЕП/зони відсутності РЕП, які визначаються співвідношеннями (3) і (4), побудовані в кутомірній площині для аналогових РЕЗ зв'язку авіації з частотною модуляцією (ЧМ) ($K_n = 3$) за умов відстаней між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, $d = 15, 40$ км, повного збігу поляризації перешкодового та корисного сигналів ($\nu = 1$), значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП, які дорівнюють відповідно: $P_j = 500, 1000$ Вт, а також за умов використання антен засобу РЕП, нормовані діаграми спрямованості яких (ДСА) $G_j(\beta, \varepsilon)$ в кутомірній площині показані на рис. 2 а, б, в.

На рис. 3 а, б показані зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (3) і (4) та побудовані для аналогових РЕЗ зв'язку авіації з ЧМ за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ наземного пункту управління (НПУ), що здійснює передачу інформації, $d = 15$ км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: $P_j = 500, 1000$ Вт; $P = 50$ Вт. Наземна станція РЕБ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 17 дБ, ДСА якої показана на рис. 2а. РЕЗ НПУ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 5 дБ. Масштаб та назви кривих вказуються лише на першому рисунку. На другому рисунку вони мають аналогічні значення.

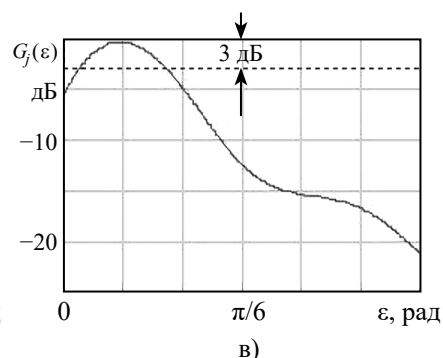
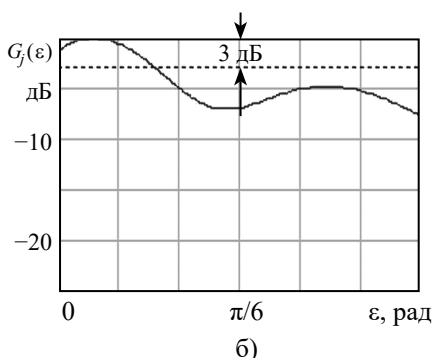
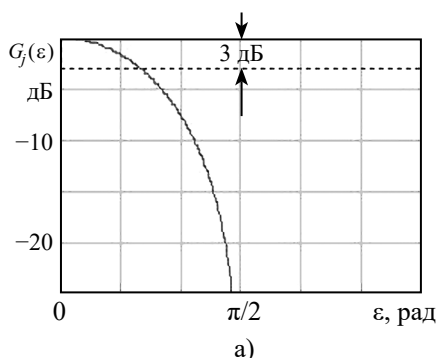


Рис. 2. Нормовані діаграми спрямованості антен засобів РЕП в кутомірній площині

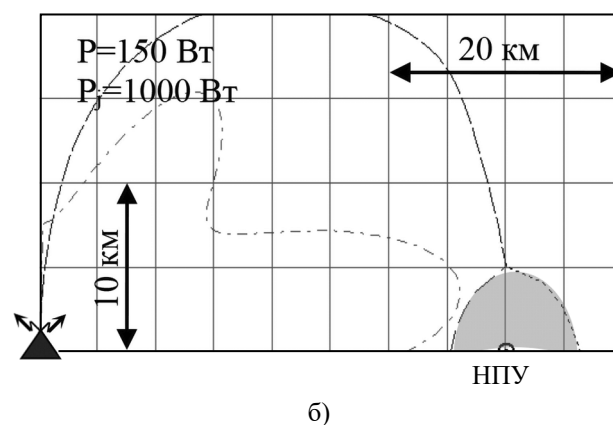
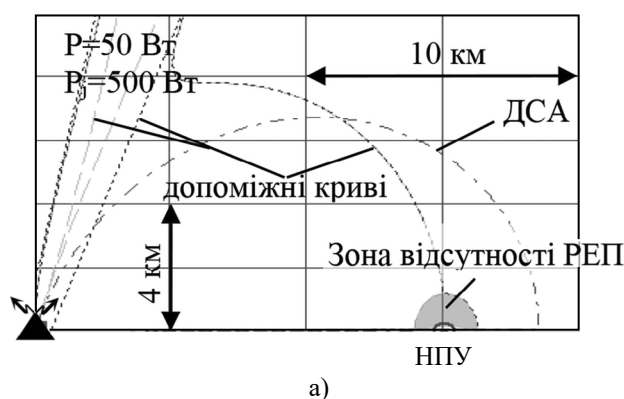


Рис. 3. Зони відсутності РЕП навколо НПУ (передового авіаційного навідника): а) $P_j = 500$ Вт; б) $P_j = 1000$ Вт

На рис. 4 а, б показані зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (3) і (4) та побудовані для аналогових бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації з ЧМ за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, $d = 40$ км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: $P_j = 500, 1000$ Вт; $P = 150$ Вт. Наземна станція РЕБ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 20 дБ, ДСА якої показана на рис. 2б. РЕЗ НПУ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 5 дБ. Масштаб та назви кривих вказуються лише на першому рисунку. На другому рисунку вони мають аналогічні значення.

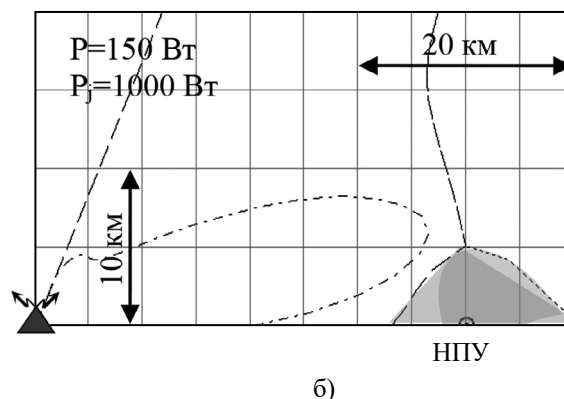
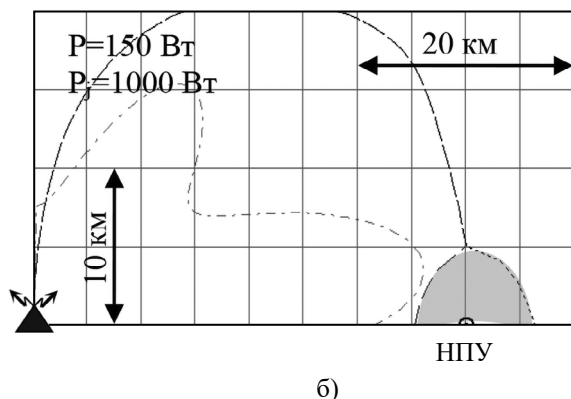
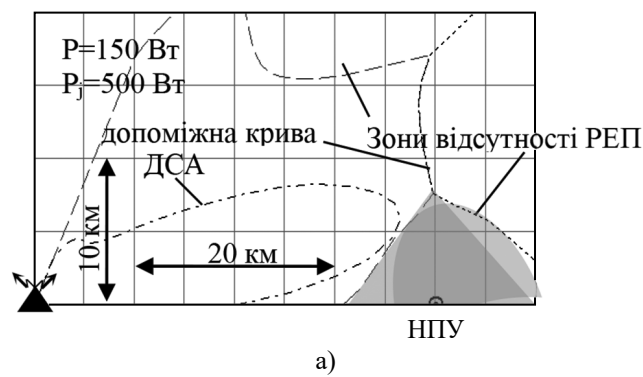
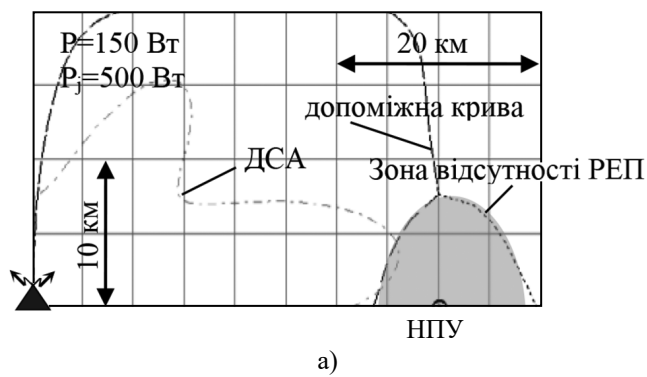


Рис. 4. Зони відсутності РЕП навколо НПУ (передового пункту управління):
а) $P_j = 500$ Вт; б) $P_j = 1000$ Вт

Рис. 5. Зони відсутності РЕП навколо НПУ (передового пункту управління):
а) $P_j = 500$ Вт; б) $P_j = 1000$ Вт

На рис. 5 а, б показані зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (3) і (4) та побудовані для аналогових бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації з ЧМ за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, $d = 40$ км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P бортового РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: $P_j = 500, 1000$ Вт; $P = 150$ Вт. Наземна станція РЕБ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 20 дБ, ДСА якої показана на рис. 2в. РЕЗ НПУ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 5 дБ. Масштаб та назви кривих вказуються лише на першому рисунку. На другому рисунку вони мають аналогічні значення. Як можна бачити, порівнюючи рис. 4а та 5а, відсутність пелюстка другого ярусу антени засобу РЕП, яка показана на рис. 2в, не забезпечує РЕП на великих висотах (у даному випадку, більше 15 км), тому при оцінці технічного проекту зразка, певну увагу слід приділяти не лише енергетичному потенціалу, а й конфігурації ДСА антенних систем засобу РЕП, що розробляється.

Просторово-енергетична модель РЕБ з бортовими РЕЗ УКХ зв'язку авіації при постановці перешкод наземними засобами РЕП дозволяє, по-перше, обґрунтовувати основні технічні вимоги до наземних засобів РЕБ, призначених для протидії таким РЕЗ, та по-друге, формулювати основні технічні вимоги з радіоелектронного захисту до бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації, які здатні діяти в умовах РЕП.

РОЗРОБКА ПРОСТОРОВО-ЕНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ РЕБ З БОРТОВИМИ РЕЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ АВІАЦІЄЮ В УМОВАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ПОДАВЛЕННЯ

Збройні сили передових країн світу активно застосовують передові технології у сфері телекомунікацій для забезпечення надійної, перешкодозахищеної та високошвидкісної передачі інформації між платформами наземного, повітряного та морського базування. Прикладом такої системи передачі інформації у збройних силах країн НАТО є MIDS (Multifunctional information distribution system / Багатофункціональна система розподілення інформації), яка стала подальшим розвитком більш старої системи JTIDS (Joint tactical information distribution system / Сумісна тактична система розподілення інформації) із використанням протоколу обміну даними Link-16 [23, 24]. Модифікації інформаційних систем MIDS та JTIDS застосовують й об'єднані повітряні сили НАТО, які дозволяють здійснювати інформаційний обмін між наземними та повітряними пунктами управління авіацією, літаками далекого радіолокаційного виявлення та управління (ДРЛВУ), а також літаками стратегічної та тактичної авіації. Аналоги таких телекомунікаційних систем управління авіацією є й на озброєнні повітряно-космічних сил рф та повітряних сил КНР [25], тому дослідження у напрямку організації РЕБ з такими системами залишаються актуальними принаймні у найближчій та середньостроковій перспективі.

Просторово-енергетична модель РЕБ з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією, яка розглядається, передбачає такі обмеження:

- 1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антен бортових РЕЗ передачі інформації телекомунікаційної системи;
- 2) перешкода є прицільною по центральній частоті спектру корисного сигналу бортового РЕЗ, що подається, тобто спектр сигналу та спектральна щільність потужності перешкоди співпадають по інтервалу частот (інтервалах частот);
- 3) координати наземних засобів РЕП ($x_{РЕП}$, $y_{РЕП}$) обираються поблизу початку координат, а координати бортових РЕЗ передачі інформації телекомунікаційної системи ($x_{РЕЗ}$, $y_{РЕЗ}$) обираються у смузі 100х300 км, при цьому розрахунки проводяться на конкретні значення висот польоту літаків та відстані між літаком та наземним або повітряним пунктом управління (літаком ДРЛВУ);
- 4) візуалізація зон РЕП / зон відсутності РЕП здійснюється у горизонтальній площині;
- 5) побудова зон РЕП / зон відсутності РЕП здійснюється для цифрових бортових РЕЗ передачі інформації телекомунікаційної мережі з розширенням спектру;
- 6) вихідними даними для побудови просторово-енергетичної моделі радіоелектронної боротьби з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією є: потужність передавача перешкод наземного засобу РЕП P_j та потужність передавача P РЕЗ наземного/ повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації; коефіцієнт завадостійкості [26, 27] системи; відстань між РЕЗ наземного / повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації, та бортовим РЕЗ літака, що здійснює прийом інформації; висота польоту літака; діаграма спрямованості $G_j(\beta, \epsilon)$ антенної системи засобу РЕП в азимутальній та кутомірній площинах відповідно.

Стисла характеристика просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією в умовах ведення РЕП наземними засобами РЕП наведена в табл. 2.

Методика побудови просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією в умовах ведення РЕП наземними

засобами РЕП ґрунтується на постановці та розв'язанні задачі оцінки впливу перешкодами довільної кількості автоматизованих станцій перешкод (АСП) на телекомунікаційну систему управління авіацією, із побудовою зон РЕП для бортових РЕЗ системи.

Потужність корисного сигналу P_s на вході приймального пристрою РЕЗ передачі інформації можна розрахувати як [6]:

$$P_s = P \cdot G(\beta, \epsilon) \cdot G_0(\beta, \epsilon) \cdot \lambda^2 / (4\pi r^2 \cdot 4\pi), \quad (5)$$

де P – потужність РЕЗ наземного/повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації; $G(\beta, \epsilon)$ – діаграма спрямованості його антенної системи в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; $G_0(\beta, \epsilon)$ – діаграма спрямованості антени бортового РЕЗ літака, що здійснює прийом інформації; r – відстань між РЕЗ, які працюють на прийом та передачу інформацію в межах телекомунікаційної мережі; λ – довжина хвилі (рис. 6).

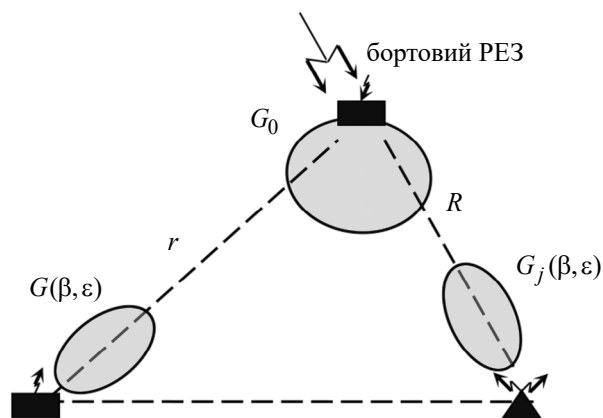


Рис. 6. Вихідні дані для розрахунку енергетичних співвідношень сигналу та перешкоди на вході прийомного пристрою бортового РЕЗ передачі інформації

Потужність перешкоди P_n з рівномірною спектральною щільністю шириною F_n на вході приймача в смузі пропускання його лінійної частини F_0 (за умови, що $F_n \geq F_0$) [6]:

$$P_n = P_j \cdot G_j(\beta, \epsilon) \cdot G_0(\beta, \epsilon) \cdot v^p \cdot v^{RF} \cdot \lambda^2 / (4\pi R^2 \cdot 4\pi), \quad (6)$$

де P_j – потужність передавача перешкод засобу радіоелектронного подавлення (РЕП); $G_j(\beta, \epsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи засобу

Таблиця 2

Складова моделі	Опис складової моделі
Призначення, область застосування моделі РЕБ	Модель описує функціонування бортових РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією в умовах впливу перешкод з боку наземних засобів РЕП
Загальна характеристика системи РЕБ	Система РЕБ складається з довільної кількості багатофункціональних автоматизованих станцій перешкод, які здійснюють РЕП в заданій зоні прямокутної форми
Детальна характеристика моделі РЕБ	Модель описується просторово-енергетичними співвідношеннями (5)...(13), які дозволяють побудувати зони РЕП. Обмеження, що застосовуються, наведені вище.

РЕП в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; R – відстань між засобом РЕП і бортовим РЕЗ, що приймає інформацію; v^p – коефіцієнт, що враховує розбіжність поляризації перешкоди від АСП та сигналу РЕЗ; $v^{RF} = F_0 / F_n$ – коефіцієнт, що враховує послаблення перешкоди АСП за рахунок неспівпадіння ширини спектральної щільності перешкоди АСП та смуги пропускання приймача бортового РЕЗ передачі інформації літака.

Беручи до уваги той факт, що потужність перешкоди набагато перевищує потужність шуму $P_n \gg P_0$, співвідношення сигнал – перешкода + шум $q^2 = P_s / (P_0 + P_n)$ на вході приймального пристрою бортового РЕЗ передачі інформації літака приблизно дорівнює співвідношенню $q^2 \approx P_s / P_n$, при цьому потужності сигналу та перешкоди визначаються співвідношеннями (5) і (6) відповідно. У випадку приймання перешкод від декількох незалежних джерел, потужності перешкод, розрахованих на підставі формули (6), складаються.

Хай (x, y) – координати i -ї АСП визначаються парою (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, I$, де I – кількість АСП, які залучаються до РЕП бортових РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією.

Отримаємо оцінку загального співвідношення «сигнал – перешкода + шум» q^2 на вході приймального пристрою бортового РЕЗ передачі інформації літака, для окремо взятої робочої пари передавач – приймач зі складу РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією. При цьому вважатиме, що $G_0(\beta, \epsilon) = G_0 = 1$, оскільки відповідно до обмеження 1) постановка перешкод здійснюється з напрямку бокових пелюстків діаграм спрямованості антен бортових РЕЗ літаків, які подавляються. Оцінка загального співвідношення «сигнал – перешкода + шум» здійснюється шляхом обчислення співвідношення «сигнал – перешкода» q^2 , при цьому, з урахуванням формул (5) і (6), результуюча перешкода формується на вході приймача бортового РЕЗ передачі інформації літака як адитивна сума перешкод від кожної АСП:

$$q_{m,n}^2 = \frac{P \cdot G(\beta, \epsilon)}{r^2 \cdot \left[\sum_{i=1}^I \frac{P_{j,i} \cdot G_{j,i}(\beta_i, \epsilon_i) \cdot v_i^p \cdot v_i^{RF}}{R_i^2} \right]}; \quad (7)$$

$$\beta_i = \arctg \left(\frac{|x_i - m \cdot \Delta|}{|y_i - n \cdot \Delta|} \right); \quad \epsilon_i = \arctg \left(\frac{H}{R_i} \right),$$

де $P_{j,i}$ – потужність передавача АСП; P – потужність передавача РЕЗ наземного/ повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації; $R_i^2 = (x_i - m \cdot \Delta)^2 + (y_i - n \cdot \Delta)^2$ – квадрат відстані між АСП та бортовим РЕЗ, що здійснює прийом інформації; (x_i, y_i) – прямокутні координати передавачів АСП; $(m \cdot \Delta, n \cdot \Delta)$ – прямокутні координати бортового РЕЗ передачі інформації, на вході якого досліджується співвідношення «сигнал – перешкода»; Δ – роздільна здатність методу; m, n – індекси елементу матриці співвідношення «сигнал – завада» $q_{m,n}^2$; r – відстань між бортовим РЕЗ, що здійснює прийом інформації, та РЕЗ наземного / повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації; v_i^p – коефі-

цієнт, що враховує розбіжність поляризації перешкоди від АСП та сигналу РЕЗ; v_i^{RF} – коефіцієнт, що враховує послаблення перешкоди АСП за рахунок неспівпадіння ширини спектральної щільності перешкоди АСП та смуги пропускання приймача РЕЗ передачі інформації; $G_{j,i}(\beta_i, \epsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи i -ї АСП в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; $G(\beta, \epsilon)$ – діаграма спрямованості за потужністю антенної системи РЕЗ наземного/ повітряного пункту управління (літака ДРЛВУ), що здійснює передачу інформації, в азимутальній та кутомірній площинах відповідно; β_i – азимутальний напрямок з i -ї АСП на бортовий РЕЗ, що подавляється; ϵ_i – кутомірний напрямок з i -ї АСП на бортовий РЕЗ, що подавляється; H – висота польоту носія бортового РЕЗ, який подавляється.

При розв’язанні основних задач РЕП найбільш важливою енергетичною характеристикою завадостійкості вважається коефіцієнт завадостійкості K_c , під яким розуміється мінімально необхідне співвідношення середньої потужності корисного сигналу P_s до середньої потужності завадового сигналу P_n на вході приймача РЕЗ в смузі пропускання його лінійної частини, при якому забезпечується задана якість функціонування РЕЗ [25, 26]:

$$K_c = (P_s / P_n)_{\min}. \quad (8)$$

Чисельні значення коефіцієнту завадостійкості K_c можуть бути знайдені лише для РЕЗ з відомими характеристиками модуляції та мультиплексування сигналів, які здійснюють передачу інформації. Завади та перешкоди не порушують функціонування РЕЗ за умови [25, 26]:

$$q^2 = (P_s / P_n)_{\text{in}} \geq K_c. \quad (9)$$

де q^2 – співвідношення потужності корисного сигналу до потужності перешкоди на вході приймача.

Нагадаємо, що простір, в межах якого $q^2 \geq K_c$, називається зоною відсутності РЕП, а при $q^2 < K_c$ – зоною РЕП. Межа цих зон проходить на рівні, коли $q^2 = K_c$. Зоною відсутності РЕП вважається простір, в межах якого РЕЗ функціонують із заданою якістю.

Тому зони РЕП $Z_{m,n}$ ($q^2 < K_c$) будуть визначатись співвідношенням:

$$Z_{m,n} = \min(q_{m,n}^2, K_c). \quad (10)$$

Відомо [16, (12.46)], що імовірність бітової помилки P_b в телекомунікаційній системі є певною функцією від співвідношення «сигнал – шум», яке припадає на біт інформації, що передається E_b / N_0 , співвідношення P_n / P_s та коефіцієнту розширення спектру сигналу $K_{\Delta F}$:

$$P_b = f \left[\frac{E_b}{N_0 + J_0} \right] = f \left[\frac{E_b / N_0}{1 + J_0 / N_0} \right] = f \left[\frac{E_b / N_0}{1 + \frac{E_b \cdot P_n}{N_0 \cdot P_s \cdot K_{\Delta F}}} \right], \quad (11)$$

де N_0, J_0 – спектральні щільності потужності шуму та перешкоди відповідно; $K_{\Delta F} = \Delta F / R$ – коефіцієнт розширення спектру сигналу; ΔF – ширина спектру сигналу; R – технічна швидкість передачі інформації в системі.

При цьому телекомунікаційна система є непрацездатною, якщо виконується нерівність [22, (2)]:

$$\frac{E_b}{N_0 + J_0} \leq 1, \quad (12)$$

яке при достатньо великому бітовому співвідношенню «сигнал – шум» E_b / N_0 досягається, коли коефіцієнт подавлення $K_n = (P_n / P_s)_{\min}$ дорівнює коефіцієнту розширення спектру сигналу:

$$K_n = (P_n / P_s)_{\min} = K_{\Delta F} = \Delta F / R. \quad (13)$$

Виходячи із співвідношення (9) та тотожності (13), коефіцієнт завадостійкості K_c телекомунікаційної мережі управління авіацією складатиме величину:

$$K_c = 1 / K_n = 1 / K_{\Delta F} = R / \Delta F. \quad (14)$$

Для ілюстрації викладеної методики побудови просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіації в умовах ведення РЕП наземними засобами РЕБ розглянемо такий приклад.

Приклад. Хай треба здійснити побудову зон РЕП (10) для телекомунікаційної мережі управління авіацією з TDMA-DS/FHSS-MSK (time division multiple access – direct sequence/ frequency hopping spread spectrum – minimum shift keying/ багатоадресна система з часовим розподілом каналів, псевдовипадковою перебудовою частоти з розширенням спектру та маніпуляцією з мінімальним зсувом) типу JTIDS, яка діє у певній смузі прямокутної конфігурації. Результат побудови зон РЕП (10) для смуги 100x300 км та висоти польоту літака $H = 5000$ м показано на рис. 7. Зона РЕП побудована за таких умов:

1) для РЕП телекомунікаційної мережі залучаються три АСП з координатами $(x_i, y_i) = (20, 20); (50, 0); (80, 20)$ км; потужність кожної АСП до 2 кВт, але енергетичний потенціал розподіляється таким чином, що для РЕП бортового РЕЗ телекомунікаційної мережі витрачається 1 кВт потужності кожної АСП. Антенна система АСП складається з 10 рупорних антен, поєднаних між собою у антенну решітку, яка характеризується діаграмою спрямованості шириною 120° (за рівнем 3 дБ) в азимутальній площині та коефіцієнтом підсилення 30 дБ;

2) телекомунікаційна мережа з TDMA-DS/FHSS-MSK типу JTIDS; РЕЗ передачі інформації, які використовуються пунктами управління наземного та/або повітряного базування характеризуються потужністю випромінювання 500, 1000 Вт; передавач РЕЗ наземного/повітряного пункту управління телекомунікаційної системи розташовується на відстані $d = 200$ км від центральної АСП з координатами $(x_2, y_2) = (50, 0)$ км (рис. 7);

3) Сигнал телекомунікаційної мережі типу JTIDS характеризується такими особливостями: а) для передачі кожних 5-х інформаційних біт використовується 32-х елементний CCSK (cyclic code shift keying) сигнал; б) кожний елемент 32-х елементного CCSK сигналу має тривалість 0,2 мкс ($R = 5$ МГц); в) кожний 32-х елементний CCSK сигнал перетворюється в MSK сигнал, який має смугу 3 МГц та передається на одній з

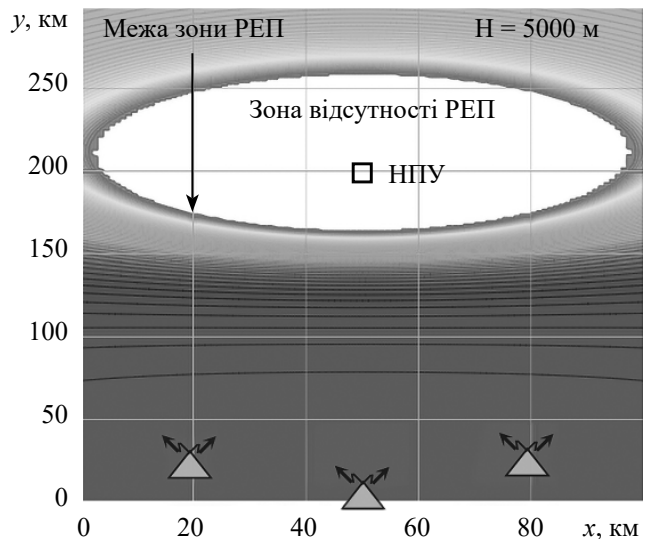


Рис. 7. Результат побудови зон РЕП (6) для телекомунікаційної системи типу JTIDS, яка функціонує у смузі 100x300 км в умовах впливу перешкод з боку трьох АСП

51 несучих частот системи зі стрибкоподібною зміною частоти сигналу зі швидкістю 77000 стрибків/с, при цьому відбувається розширення спектру сигналу до $\Delta F = 51 \times 3$ МГц = 153 МГц;

4) коефіцієнт завадостійкості K_c телекомунікаційної мережі типу JTIDS, розрахований за формулою (14), становить $K_c = 0,033$ ($K_n = 30,6$).

Оскільки зона РЕП, яка наведена на рис. 7, відображає вплив перешкодами лише в горизонтальній площині, доцільно здійснити побудову зон РЕП у вертикальній площині за умов застосування однієї АСП на основі попередньої моделі, яка визначається співвідношеннями (1)...(4) та може адекватно описувати вплив перешкодами на бортові цифрові РЕЗ передачі інформації авіації.

На рис. 8 а, б показані зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (3) і (4) та побудовані для бортових РЕЗ телекомунікаційної мережі з TDMA-DS/FHSS-MSK типу JTIDS за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ наземного пункту управління (НПУ), що здійснює передачу інформації, $d = 200$ км, значень потужності передавача перешкод P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ НПУ, що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно: $P_j = 1000$ Вт; $P = 500, 1000$ Вт.

Наземна станція РЕБ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 30 дБ, ДСА якої показана на рис. 8а. РЕЗ НПУ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 8 дБ. Масштаб та назви кривих вказуються лише на першому рисунку. На другому рисунку вони мають аналогічні значення.

На рис. 9 а, б показані зони відсутності РЕП (сірим фоном), які визначаються співвідношеннями (3) і (4) та побудовані для бортових РЕЗ телекомунікаційної мережі з TDMA-DS/FHSS-MSK типу JTIDS за умов відстані між засобом РЕП та РЕЗ повітряного пункту управління (ПвПУ), що здійснює передачу інформації, $d = 200$ км, значень потужності передавача перешкод

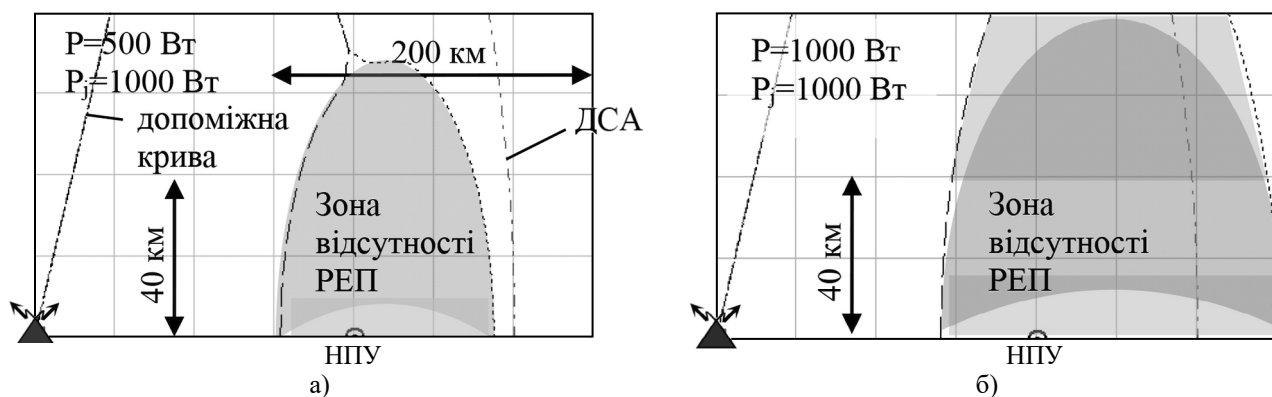


Рис. 8. Зони відсутності РЕП навколо НПУ (центру управління та оповіщення): а) $P = 500$ Вт; б) $P = 1000$ Вт

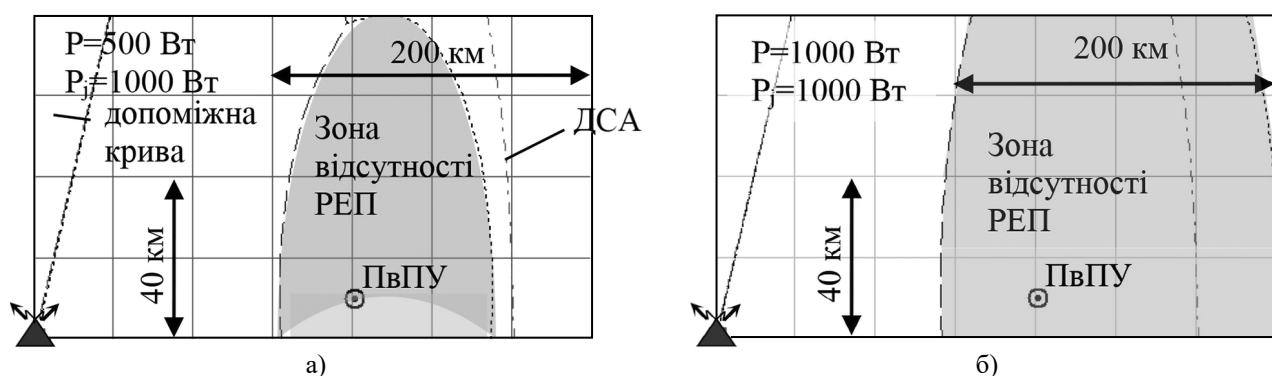


Рис. 9. Зони відсутності РЕП навколо ПвПУ (літака ДРЛВУ): а) $P = 500$ Вт; б) $P = 1000$ Вт

P_j засобу РЕП та потужності передавача P РЕЗ ПвПУ, що здійснює передачу інформації, які дорівнюють відповідно $P_j = 1000$ Вт; $P = 500, 1000$ Вт. Наземна станція РЕБ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 30 дБ, ДСА якої показана на рис. 8, а. РЕЗ ПвПУ використовує антенну систему з коефіцієнтом підсилення 8 дБ. Масштаб та назви кривих вказуються лише на першому рисунку. На другому рисунку вони мають аналогічні значення.

Якщо порівняти рис. 8, а та 8, б, а також 9, а та 9, б, можна помітити, що збільшення у два рази потужності РЕЗ НПУ (ПвПУ) мало впливає на положення ближньої межі зони відсутності РЕП (показана штриховою лінією), в той час як дальня межа зони відсутності РЕП (показана штрих-пунктирною лінією) розширюється приблизно у два рази відносно положення пункту управління. Якщо порівняти рис. 8, б та рис. 7, можна помітити, що застосування одночасно трьох АСП (кожна потужністю 1000 Вт та з коефіцієнтом підсилення антенної системи 30 дБ) дозволяє суттєво звужити зону відсутності РЕП по осі ординат з 220 км до 100 км, тобто приблизно у два рази.

ВИСНОВКИ

1. Просторово-енергетична модель РЕБ з бортовими РЕЗ УКХ зв'язку авіації при постановці перешкод наземними засобами РЕП дозволяє, по-перше, обґрунтовувати основні технічні вимоги до наземних засобів РЕБ, призначених для протидії таким РЕЗ, та по-друге, формулювати основні технічні вимоги з радіоелектронного захисту до бортових РЕЗ УКХ зв'язку авіації, які здатні діяти в умовах РЕП.

2. Отримана методика побудови просторово-енергетичної моделі РЕБ з бортовими РЕЗ телекомунікаційної системи управління авіацією в умовах ведення РЕП наземними засобами РЕБ ґрунтується на постановці та розв'язанні задачі оцінки впливу перешкодами довільної кількості АСП на телекомунікаційну мережу із побудовою зон РЕП для окремих РЕЗ системи, які передають та/або приймають інформацію. Просторово-енергетична модель РЕБ з бортовими РЕЗ системи управління авіацією в умовах ведення РЕП наземними засобами РЕБ може застосовуватись для оцінки ефективності РЕП телекомунікаційної мережі в смузі дій наземних підрозділів РЕБ. Запропонована просторово-енергетична модель дозволяє, з одного боку, формулювати вимоги з радіоелектронного захисту РЕЗ телекомунікаційних систем управління авіацією, які функціонують в умовах впливу перешкод, а з іншого боку, формувати основні технічні вимоги до АСП в частині, що стосується РЕП авіаційних РЕЗ передачі інформації систем управління авіацією.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Electronic Warfare Handbook. The Shephard Press Ltd. 2008.
2. Оружие и технологии России. Т. 13. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы. М.: Издательский дом «Оружие и технологии». 2006. 686 с.
3. Вооружение Воздушно-космических Сил России. Т. 1. Современная техника ВКО и РЭБ России. М.: Студия Этника. 2016. 560 с.
4. Кузьменко Т.П., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Оцінка технічного рівня сучасних зразків ОБТ радіоелектрон-

- ної боротьби сухопутних військ ЗС рф. Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2013. № 4(51). С. 166–180.
5. Бичков А.М., Зібін С.Д., Попов А.О., Сергієнко В.Д. Аналіз сучасного стану розвитку багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2017. № 1(28). С. 135–143.
 6. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат. 1989. 350 с.
 7. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Методы и средства радиоэлектронной борьбы. М.: Инфра-Инженерия. 2021. 376 с.
 8. Лучук Е.В. Оцінка ефективності радіоподавлення сучасних засобів радіозв'язку АСУ військами. Воєн.-техн. зб. Акад. СВ. 2010. № 2. С. 73–77.
 9. Журавський Ю.В. Оцінювання ефективності радіоподавлення систем радіозв'язку в умовах невизначеності координат приймачів. Системи обробки інформації. 2009. № 2(76). С. 45–47.
 10. Li, M., Koutsopoulos, I. & Poovendran, R. (2007). Optimal jamming attacks and network defence policies in wireless sensor networks. *IEEE InfoCOM*. IEEE. Pp. 307–315.
 11. Harjula, I., Pinola, J. & Prokkola, J. (2011). Performance of IEEE 802.11 based WLAN devices under various jamming signals. *MilCOM*. IEEE. Pp. 129–135.
 12. Налапко О.Л., Попов А.О., Твердохлібов В.В., Шишацький А.В. Оцінка ефективності телекомунікаційних мереж тактичної ланки управління, що функціонують в умовах радіоелектронного подавлення. Озброєння та військова техніка. 2020. № 2(26). С. 104–111. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.2\(26\).104-111](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.2(26).104-111).
 13. Welch, M. & Pywell, M. (2012). *Electronic Warfare Test and Evaluation*. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
 14. Adamy, D.L. (2006). *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*. Scitech Publishing.
 15. Leonov, S.A. (2001). *Handbook of Computer Simulation in Radio Engineering, Communications and Radar*. Artech House.
 16. Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall. 1079 p.
 17. Zhang, K.Q.T. (2016). *Wireless Communications: Principles, Theory and Methodology*. Wiley and Sons. 724 p.
 18. Vitetta, G.M., Taylor, D.P., Colavolpe, G., Pancaldi, F. & Martin, P.A. (2013). *Wireless Communications: Algorithmic Techniques*. Wiley and Sons. 724 p.
 19. Lu, Z., Wang, W. & Wang, C. (2014). Modeling, evaluation and detection of jamming attacks in time-critical wireless application. *IEEE Trans. on Mobile Computing*. Vol. 13. № 8. Pp. 146–159.
 20. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Моделі радіоелектронної боротьби з багатоканальними (багато-станційними) системами передачі інформації. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2021. № 4(32). С. 76–87. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4\(32\).76-87](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4(32).76-87).
 21. Білобородова Л.В., Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Використання моделей радіоелектронної боротьби з системами передачі інформації та оцінка їх енергетичної ефективності. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2022. № 2(34). С. 122–127. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).122-127](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).122-127).
 22. Зібін С.Д., Попов А.О., Твердохлібов В.В. Моделі радіоелектронної боротьби з наземними робототехнічними комплексами. Озброєння та військова техніка. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України. 2022. № 3(35). С. 91–101. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3\(35\).91-101](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3(35).91-101).
 23. Слюсар В.И. Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2008. № 4. С. 66–71.
 24. Kao, C. (2008). *Performance Analysis of a JTIDS/LINK-16-Type Waveform Transmitted over Slow, Flat Nakagami Fading Channels in the Presence of Narrowband Interference*. PhD thesis. Naval Postgraduate School. Monterey. CA. USA. 208 p.
 25. Каталог «Оружие России». М.: Студия Этника. 2018. 688 с.
 26. Волошин И.А., Быков В.В., Васин В.В. Справочник по радиоэлектронным системам в 2-х т. Т. 2. М.: Энергия. 1979. 368 с.
 27. Максимов М.В., Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х. Защита от помех / под ред. М.В. Максимова. М.: Сов. Радио. 1976. 496 с.

REFERENCES

1. *Electronic Warfare Handbook*. The Shephard Press Ltd. 2008.
2. “Оружие и технологии России. Т. 13. Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы” [Weapons and Technologies of Russia. Vol. 13. Control and Communication Systems, Electronic Warfare Systems], Weapon and Technologies. M. 2006. 686 p.
3. “Vooruzhenie Vozdushno-kosmicheskikh sil rossii. T. 1. Sovremennaya tekhnika VKO i REB rossii” [Weapon Systems of the Russian Air and Space Forces. Vol. 1. Modern Air and Space Defence Weapons and EW Systems of Russia], Etnica Studio, M. 2016. 560 p.
4. Kuzmenko, T.P., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2013). “Otsinka tekhnichnogo ravnnya suchasnykh zrazkiv OVT radioelektronnoi borotby suhoputnykh viisk ZS rf” [Estimating technology level of recent EW systems of Army of Russian Federation Armed Forces], Proc. of CSRI of Armament and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine. № 4(51). Pp. 166–180.
5. Bychkov, A.M., Zibin, S.D., Popov, A.A. & Sergienko, V.D. (2017). “Analiz suchasnoho stanu rozvytku bahatofunktsionalnykh zasobiv ta kompleksiv radioelektronnoi borotby” [Analysis of state-of-the-art of multifunctional EW systems development]. *Modern information technologies in sphere of security and defence*. № 1(28). Pp. 135–143.
6. Paliy, A.I. (1989). “Radioelektronnaia borba” [Electronic Warfare], Voenizdat. M. 350 p.
7. Perunov, Y.M. & Kuprijanov, A.I. (2021). “Metody i sredstva radioelektronnoi borby” [Methods and means of electronic warfare], Infra Engineering, M. 376 p.
8. Luchuk, E.V. (2010). “Otsinka efektyvnosti radio-podavleniya suchasnykh zasobiv radiozviazku ASU viiskamy” [Estimating efficiency of jamming of modern

- communication systems of CCCS]. Voen.-tehn. zb. Akad. SV. № 2. Pp. 73–77.
9. Zhuravskiy, Yu.V. (2009). "Otsiniuvannia efektyvnosti radiopodavleniya system radiov'iazku v umovakh nevyznachenosti koordynat prymachiv" [Estimating efficiency of jamming of communication systems under uncertainties conditions of receivers coordinates], *Sistemy obrobky informatsii*. № 2(76). Pp. 45–47.
 10. Li, M., Koutsopoulos, I. & Poovendran, R. (2007). Optimal jamming attacks and network defence policies in wireless sensor networks. *IEEE InfoCOM*. IEEE. Pp. 307–315.
 11. Harjula, I., Pinola, J. & Prokkola, J. (2011). Performance of IEEE 802.11 based WLAN devices under various jamming signals. *MilCOM*. IEEE. Pp. 129–135.
 12. Nalapko, O.L., Popov, A.A., Tverdohlebov, V.V. & Shishatsky, A.V. (2020). "Otsinka efektyvnosti telekomunikatsiynykh merezh taktychnoi lanky upravlinnia, shcho funktsionuiut v umovakh radioelektronnoho podavleniya" [Estimating efficiency of tactical telecommunication network operating under jamming conditions], *Weapons and Military Equipment*. № 2(26). Pp. 104–111.
 13. Welch, M. & Pywell, M. (2012). *Electronic Warfare Test and Evaluation*. NATO Research and Technology Organization. 314 p.
 14. Adamy, D.L. (2006). *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*. Scitech Publishing.
 15. Leonov, S.A. (2001). *Handbook of Computer Simulation in Radio Engineering, Communications and Radar*. Artech House.
 16. Sklar, B. (2001). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall. 1079 p.
 17. Zhang, K.Q.T. (2016). *Wireless Communications: Principles, Theory and Methodology*. Wiley and Sons. 724 p.
 18. Vitetta, G.M., Taylor, D.P., Colavolpe, G., Pincaldi, F. & Martin, P.A. (2013). *Wireless Communications: Algorithmic Techniques*. Wiley and Sons. 724 p.
 19. Lu, Z., Wang, W. & Wang, C. (2014). Modeling, evaluation and detection of jamming attacks in time-critical wireless application. *IEEE Trans. on Mobile Computing*. Vol. 13. № 8. Pp. 146–159.
 20. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2021). "Modeli radioelektronnoi borotby z bagatokanalnymi (bagatostantsiynymi) systemamy peredachi informatsii" [Simulating electronic counter measures against multichannel (multi-station) information transmitting systems], *Weapons and Military Equipment*. K. No. 4(32). Pp. 76–87. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4\(32\).76-87](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.4(32).76-87).
 21. Biloborodova, L.V., Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2022). "Vykorystannia modelei radioelektronnoi borotby z systemamy peredachi informatsii dlia otsinky yikh energetychnoi efektyvnosti" [Exploring simulation of electronic counter measures against information transmitting systems for estimating their energetic efficiency], *Weapons and Military Equipment*. K. No. 2(34). Pp. 122–127. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2\(34\).122-127](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.2(34).122-127).
 22. Zibin, S.D., Popov, A.A. & Tverdohlebov, V.V. (2022). "Modeli radioelektronnoi borotby z nazemnymy roboto tekhnichnymy kompleksamy" [Models of radio-electronic warfare with ground robotic technical complexes], *Weapons and Military Equipment*. K. No. 3 (35). Pp. 91–101. [https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3\(35\).91-101](https://doi.org/1034169/2414-0651.2022.3(35).91-101).
 23. Sliusar, V.Y. (2008). "Voennaia sviaz stran NATO: problemy sovremennykh tekhnologii" [Military communications of NATO countries: problems of modern technologies], *Electronics: Science, Technology, Business*. No. 4. Pp. 66–71.
 24. Kao, C. (2008). *Performance Analysis of a JTIDS/LINK-16-Type Waveform Transmitted over Slow, Flat Nakagami Fading Channels in the Presence of Narrowband Interference*. PhD thesis. Naval Postgraduate School. Monterey. CA. USA. 208 p.
 25. "Katalog «Oruzhiye rossii»" [Catalog «Weapons of Russia»], *Studio Ethnica*. M. 2018. 688 p.
 26. Voloshyn, Y.A., Bykov, V.V. & Vasin, V.V. (1979). "Spravochnik po radioelektronnym systemam" [Handbook of electronic systems]. Vol. 2. M.: Energy. 368 p.
 27. Maksimov, M.V., Bobnev, M.P. & Krivitsky, B.Kh. (1976). "Zashchita ot pomekh" [Interference protection], *Soviet Radio*. M. 496 p.

**Zibin S., Popov A., Tverdohlebov V.,
Biloborodova L.**

DEVELOPING THE MODELS OF ELECTRONIC WARFARE AGAINST BOARD COMMUNICATION AND INFORMATION TRANSMITTING SYSTEMS OF AVIATION

We claim that for formulating the main specification requirements for ground-based electronic warfare systems against board electronic systems of aviation one should have such the models: spatial-energetic electronic warfare model against board very high frequency communication systems and spatial-energetic electronic warfare model against board telecommunication command and aviation control systems. We bring a brief description of these electronic warfare models in the form of tables. We introduce the constraints determining the developed electronic warfare models. The first model is based on the criterion of electronic counter measures coefficient, whereas the second one is based on the criterion of electronic counter-counter measures coefficient. We state that the afore mentioned electronic warfare models create the basis for substantiating the main specification requirements for ground-based electronic warfare systems, as well as the requirements with respect to electronic counter-counter measures for both board very high frequency communication systems and board telecommunication command and aviation control systems.

Keywords: *electronic warfare model, automated electronic counter measures system, telecommunication command and aviation control system, board VHF communication system, board information transmitting system, ground-based/ aerial-based command and aviation control post, jamming zone, signal-to-noise ratio, signal-to-interference ratio.*

Відомості про авторів:**Зібін Сергій Данилович**

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Попов Андрій Олексійович

кандидат технічних наук, доцент
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Твердохлібов Володимир Віталійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління Центрального
науково-дослідного інституту озброєння та військової
техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Білобородова Любов Володимирівна

молодший науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>

Information about the authors:**Zibin Sergey**

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Popov Andrey

Candidate of Technical Sciences
Leading Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Tverdochlebov Vladimir

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Chief of Scientific Research Management of Central
Scientific Research Institute of Armament and Military
Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Biloborodova Lubov

Junior Researcher
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0335-240X>

Стаття надійшла до редколегії 21.05.2023.