

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-20>

УДК 621.3.095.21:621.3.018

Олександр ШУЛЬГА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-2472-6814>

Валерія СОКІРІНА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-2628-6655>

## ВИМІРЮВАННЯ ЗАВОДОСТІЙКОСТІ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ТЕОРІЇ ІГОР В УМОВАХ НЕВИЗНАЧНИХ ЗАВАД

*Питанням завадостійкості супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) особливо першочергово приділяється увага при виконанні навігаційних задач у військовій справі[1,2,3].. Характерною рисою СРНС є те, що вони взаємодіють з дуже слабкими сигналами (-155...-160 дБ/Вт), а приймання сигналів здійснюється з верхньої півсфери слабкоспрямованої антени.*

*У статті розглянуто заходи підвищення завадостійкості СРНС за рахунок кодування сигналів та зв'язок з навігаційними супутниками в діапазоні частот L1 і L2. Уведення загальнодоступних і закритих (військових) кодів недостатнє у зв'язку з інтенсивним завантаженням радіочастотних діапазонів, створенням нових методів формування завад[3].*

*Визначено, що без гарантованої інформації про вимірювану завадову обстановку споживач діє на свій ризик, виконуючи навігаційні визначення. Звідси випливає, що апаратура споживача повинна мати функцію захисту від навмисних невизначених завад. У зв'язку з цим припускається, що в зоні дії СРНС відповідні служби вимірюють і контролюють електромагнітну сумісність радіоелектронних засобів.*

*Ключові слова: супутникова радіонавігаційна система, теорія ігор, вимір частот, невизначеність, завадостійкість, корегування, супутник, навігаційний приймач.*

Oleksandr SHULGA, Valeria SOKIRINA

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute

## MEASURING THE RELIABILITY OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS USING THE METHOD OF GAME THEORY IN CONDITIONS OF UNCERTAIN INTERFERENCES

*Special attention is given to the issues of immunity of SRNS when performing navigational tasks in military affairs. A characteristic feature of SRNS is that they interact with very weak signals (-155...-160 dB/W), and reception of signals is carried out from the upper hemisphere by a weakly directional antenna. The article deals with measures to improve the immunity of the SRNS due to signal coding and communication with navigation satellites in the L1 and L2 frequency range. The introduction of publicly available and closed (military) codes is insufficient in connection with the intensive loading of radio frequency bands, the creation of new methods of jamming. It was determined that without guaranteed information about the malfunctioning situation, the consumer acts at his own risk, performing navigation determinations. It follows from this that the consumer's equipment must have a function of protection against intentional unspecified interference. In this regard, it is assumed that the relevant services control the electromagnetic compatibility of radio-electronic means in the area of operation of the SRNS.*

*Keywords: satellite radio navigation system, game theory, frequency measurement, uncertainty, immunity, correction, satellite, navigation receiver.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Найбільш небезпечними завадами є синусоїдальні та шумоподібні сигнали; штатне функціонування СРНС під час дії таких завад зберігається, якщо їх інтенсивність на 10... 12 дБ перевищує мінімально допустимий рівень сигналу (-160 дБ/Вт).[4]

Основними причинами порушення штатного функціонування СРНС через впливи завад є застосування непередбачених штатним режимом додаткових радіоелектронних засобів цивільного чи військового призначення, недотримання норм електромагнітної сумісності під час постановки на озброєння нових радіоелектронних засобів, а також навмисне влаштування завад з повітря, моря чи суші.

Норми завадостійкості радіоканалів СРНС призначені для цивільних споживачів і не розраховані на влаштування навмисних завад. Цим можна пояснити відсутність норм на заваду, яка є копією сигналів, випромінюваних навігаційними супутниками.

Стосовно цього за результатами експериментів встановлено, що в межах прямої видимості гармонійний сигнал потужністю 1 Вт на відстані 500 км призводить до збоїв у роботі навігаційного приймача за сигналами GPS.

### Постановка задачі дослідження

Інтерес викликає завада, створювана ретрансляцією сигналів навігаційних супутників (рис.1). Суть цього способу полягає в тому, що в точці з координатами  $X, Y, Z$  встановлюється антена, яка на несучих частотах супутників приймає випромінювані сигнали. Ці сигнали підсилюються і випромінюються в напрямку об'єктів, для яких призначені завади. Якщо інтенсивність завади достатня, то навігаційний приймач об'єкта виміряє та сприйме ретрансльовані сигнали, як і сигнали навігаційних супутників.

Позначимо відстань між ретранслятором і навігаційними супутниками через  $R_k$ , а між ретранслятором і об'єктом – через  $R$ . Установимо навігаційний приймач у точці, де розміщений ретранслятор, і визначимо його координати.

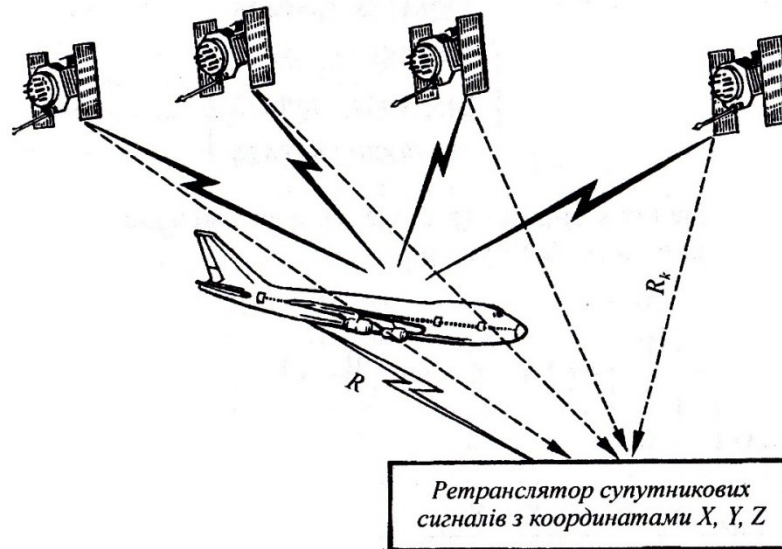


Рис. 1. Схема створення умисної завади за допомогою ретранслятора сигналу супутників СРНС

Навігаційний приймач за даними ефемерид розрахує координати навігаційних супутників у такий спосіб:

$$\begin{bmatrix} S_{v1} \\ S_{v2} \\ S_{v3} \\ S_{v4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15524471,175 & -16649826,222 & 13512272,387 \\ -2304058,534 & -2327906,465 & 11917038,105 \\ 16680243,357 & -3069625,561 & 20378551,047 \\ -14799931,95 & -2142358,24 & 3039947,224 \end{bmatrix} \quad (1)$$

У кожному рядку матриці (1) записані координати супутників у послідовності  $S_{vkx}, S_{vky}, S_{v kz}$ , де  $k=1,2,3,4$  – умовні номери супутників.

Потім приймач виміряє псевдовідстані до супутників:

$$\begin{bmatrix} PR_1 \\ PR_2 \\ PR_3 \\ PR_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22231788,1858435 \\ 19907887,0508432 \\ 24553942,1748433 \\ 21478880,8528424 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Даних, наведених у виразах (1) і (2), достатньо для обчислення координат за рекурентною формулою:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y \\ Z \\ \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ \Delta t_i \end{bmatrix} + \{ [A_{i-1}]^T \times [A_{i-1}] \} \times [A_{i-1}]^T \times [\Delta PR_{i-1}]^T, \quad (3)$$

де:

$$A_{ik} = \left[ \begin{array}{ccc|c} \frac{S_{v_{kx}} - x_i}{R_{ik}} & \frac{S_{v_{ky}} - y_i}{R_{ik}} & \frac{S_{v_{kz}} - z_i}{R_{ik}} & -1 \end{array} \right] - k\text{-ий рядок матриці } A \text{ для } i\text{-го циклу; } P_{ik} - \text{відстань між}$$

$k$ -м супутником та обчисленими навігаційним приймачем координатами на  $i$ -му циклі;  $\Delta PR_{i-1}$  - різниця між розрахунковими та вимірними псевдовідстанями на  $i$ -му циклі.

Якщо у формулу (3) підставимо дані з виразів (1) і (2), та початкове наближення (координати центра

Землі), підсумковий результат (координати ретранслятора):

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Установимо навігаційний приймач на об'єкті, віддаленому від ретранслятора, наприклад, на 100 км (100 000 м), що еквівалентне запізненню сигналу на 0,333564095198152мс. Згідно з рис.1, відстані поширення навігаційних сигналів "супутники-ретранслятор-об'єкт" (псевдовідстані) дорівнюватимуть  $R_{ik} + R$  або

$$\begin{bmatrix} PR'_1 \\ PR'_2 \\ PR'_3 \\ PR'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22361788,1858435 \\ 20007887,0508432 \\ 24653942,1748433 \\ 21578880,5828424 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Застосовуючи ту саму процедуру розрахунку координат, за даними виразу (3) дістанемо результат (4). Тобто навігаційний приймач, який працює за ретрансльованим завадовим сигналом і встановлений на об'єкті, віддаленому від ретранслятора на 100 км, визначив не власні координати, а координати ретранслятора.

Одним із чинників зниження вразливості супутникових радіонавігаційних систем є їх протидія впливу навмисних і ненавмисних перешкод. Підвищення завадостійкості приймальної апаратури припускає реалізацію в ній засобів захисту від перешкод, що включає: створення схем аналізу електромагнітної обстановки і використання внутрішніх виявлювачів перешкод, спеціальних схем і алгоритмів придушення перешкод (фільтрів, розв'язок, і так далі), використання керованої просторової вибіркості синтезованих антенних систем, зокрема з «нулями» в напрямі на перешкоду, різних схем завадостійкого кодування, найчастіше різних варіантів згорткових кодів (іноді в сполученні з кодами Рида-Соломона), а також турбо-коди [4].

### Основна частина

Розглянемо випадок, коли вплив навмисної перешкоди зводиться до маскуванню під корисний сигнал. Тоді постає проблема вибору оптимальної стратегії виявлення приймаючою стороною корисного сигналу[4,5].

Для вирішення такої задачі пропонується використання ігрового підходу (або мінімаксного), адже саме там, де конфліктна ситуація в каналі зв'язку носить явний характер (має місце активна радіопротидія), застосування методів теорії ігор є найбільш виправданим.

Варто зазначити, що завади істотно змінюють характер стратегії системи спостереження і показник якості розпізнавання (ціну гри). У будь-якій практичній задачі їх варто враховувати.

Постановка задачі коротко полягає в наступному. Маємо два джерела  $S_1$  і  $S_2$ , кожне з яких може посилати два різних сигнали  $n_1$  і  $n_2$ . Включення джерел відбувається за випадковим законом, причому в будь-який момент часу може працювати тільки одне джерело. Імовірність включення  $S_1$  дорівнює  $p$ , тоді  $S_2$  -  $(1-p)$ . Джерело  $S_2$  веде активну антагоністичну гру проти системи спостереження, маскуючись під  $S_1$ . Дія завад зводиться до трансформації посилок з імовірністю  $p_0 < 1/2$ . Очевидно, що знаходження оптимальної стратегії доцільно з позиції ефективності корисного джерела  $S_1$ . Для розв'язання поставленої задачі пропонується спочатку максимальне спрощення платіжної матриці за допомогою методів теорії ігор, і потім застосування мінімаксного розв'язку спрощеної платіжної матриці.

На виході є система спостереження СРНС, що виносить рішення про наявність того або іншого джерела у сфері спостереження. У силу випадковості включення джерел і дії завад можливі як правильні,

так і помилкові рішення. Нехай  $t$  - виграш системи спостереження за умови правильного рішення, а  $f$  - за умови неправильного рішення, причому  $t > f \geq 0$ . Тут прийнято рівноцінним будь-яке правильне і будь-яке неправильне рішення. Результуючим показником приймається середній виграш. При необхідності оцінки ефективності роботи джерела  $S_2$  досить змінити знак платежів. Наприклад, умовні стратегії системи спостереження мають вигляд (5).

Вирази (5) читаються наступним чином:  $I_2(n_1; n_2 / n_1) = [S_2; S_2]$  означає умовну стратегію, таку, що якщо джерело  $S_2$  посилає сигнал  $n_1$ , то при одержанні  $n_1$  на вході системи спостереження виноситься рішення  $S_2$ , а при одержанні сигналу  $n_2$  виноситься рішення  $S_2$ .

Розглянемо складання платіжної матриці та одержуване рішення гри. Кінцеве число стратегій (вісім) системи спостереження і джерела  $S_2$  (два) приводить до матричної гри  $8 \times 2$ .

$$\begin{aligned}
 I_1(n_1; n_2 / n_1) &= [S_1; S_2] \\
 I_2(n_1; n_2 / n_1) &= [S_2; S_2] \\
 I_3(n_1; n_2 / n_1) &= [S_2; S_1] \\
 I_4(n_1; n_2 / n_1) &= [S_1; S_1] \\
 I_5(n_1; n_2 / n_2) &= [S_1; S_2] \\
 I_6(n_1; n_2 / n_2) &= [S_2; S_2] \\
 I_7(n_1; n_2 / n_2) &= [S_2; S_1] \\
 I_8(n_1; n_2 / n_2) &= [S_1; S_1]
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$A = \begin{pmatrix}
 t(1-p_0) + fp_0 & t[p(1-p_0) + p_0(1-p)] + f[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] \\
 t(1-p) + fp & t(1-p) + fp \\
 tp_0 + f(1-p_0) & t[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] + f[p(1-p_0) + p_0(1-p)] \\
 tp + f(1-p) & tp + f(1-p) \\
 t[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] + f[p(1-p_0) + p_0(1-p)] & tp_0 + f(1-p_0) \\
 t(1-p) + fp & t(1-p) + fp \\
 t[p(1-p_0) + p_0(1-p)] + f[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] & t(1-p_0) + fp_0 \\
 tp + f(1-p) & tp + f(1-p)
 \end{pmatrix} \tag{6}$$

Обчислюючи математичні очікування виграшу при всіх сполученнях стратегій двох сторін, знайдемо платіжну матрицю гри (6), у якій рядки - умовні стратегії  $I_1 - I_8$ , перший стовпець сигнал  $n_2$ , другий -  $n_1$ . Зіставляючи елементи отриманої матриці, помічаємо, що стратегії  $I_2$  та  $I_6$ , а також  $I_4$  та  $I_8$  є попарно дублюючими, таким чином  $I_6$  та  $I_8$  можуть бути видалені з матриці. Крім того, з матриці видно, що при всіх  $p$  та  $p_0$  стратегія  $I_1$  домінує  $I_5$ , а стратегія  $I_7$  домінує  $I_3$ , таким чином,  $I_5$  та  $I_7$  також можуть бути видалені з матриці. Після цього ігрова матриця буде мати порядок  $4 \times 2$  зі стратегіями  $I_1, I_2, I_4, I_7$  (3.13).

Значення елементів платіжної матриці залежать від співвідношення ймовірностей появи джерел сигналів  $p$  та ймовірності трансформації сигналу  $p_0$ , причому є декілька характерних діапазонів цього зв'язку, що дозволяють у кожному з них спростити платіжну матрицю. Знайдемо оптимальні стратегії системи спостереження в цьому випадку. Під оптимальністю стратегій системи спостереження мається на увазі їхня властивість бути координатою стратегічної сідової точки середнього виграшу, а під ціною гри - його мінімакс.

$$A' = \begin{vmatrix} t(1-p_0) + fp_0 & t[p(1-p_0) + p_0(1-p)] + f[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] \\ t(1-p) + fp & t(1-p) + fp \\ tp + f(1-p) & tp + f(1-p) \\ t[p(1-p_0) + p_0(1-p)] + f[pp_0 + (1-p)(1-p_0)] & t(1-p_0) + fp_0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

1. Нехай спочатку

$$p \leq \frac{1}{3-2p_0}. \quad (8)$$

Неважно бачити, що рядку, який відповідає  $I_2$ , домінує рядок стратегії  $I_4$ , а також опуклу лінійну комбінацію рядків, що відповідають  $I_1$  і  $I_7$ , і, отже,  $I_2$  є оптимальною. Стратегії  $I_2$  відповідає дублююча стратегія  $I_6$ , яка також є оптимальною. Отже, у діапазоні (8) маємо:

$$\begin{aligned} I_2^*(n_1; n_2 / n_1) &= [S_2; S_2], \\ I_6^*(n_1; n_2 / n_2) &= [S_2; S_2]. \end{aligned} \quad (9)$$

Ціна гри за умови (9) дорівнює

$$\mathcal{G} = pf + (1-p)t. \quad (10)$$

2. Нехай тепер

$$\frac{1}{3-2p_0} \leq p \leq \frac{1}{1+2p_0}. \quad (11)$$

У даному випадку домінує лінійна комбінація елементів стратегій  $I_1$  та  $I_7$  з коефіцієнтом  $1/2$ , таким чином, при умові (11) маємо змішану оптимальну стратегію

$$\bar{X}^* = \|1/2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/2 \ 0\|. \quad (12)$$

Неважно бачити, що ціна гри за умови (11):

$$\mathcal{G} = \frac{t+f}{2} + \frac{t-f}{2} p(1-2p_0). \quad (13)$$

3. Розглянемо третій діапазон

$$\frac{1}{1+2p_0} \leq p \leq 1. \quad (14)$$

Тут стратегія  $I_4$  – домінуюча, і в парі зі своєю дублюючою стратегією  $I_8$  складають оптимальну групу:

$$\begin{aligned} I_4^*(n_1; n_2 / n_1) &= [S_1; S_1], \\ I_8^*(n_1; n_2 / n_2) &= [S_1; S_1]. \end{aligned} \quad (15)$$

Ціна гри дорівнює

$$\mathcal{G} = pt + (1-p)f. \quad (16)$$

Розглянута ігрова задача цілком вирішена. Обговоримо отримані результати.

При достатньо малих ймовірностях появи джерела  $S_1$ , що визначаються нерівністю (10 3.17), оптимальним є рішення про наявність  $S_2$  при будь-яких прийнятих сигналах і при будь-яких діях  $S_1$ . При цьому показник якості роботи системи спостереження – ціна гри, – не залежить від параметру завад  $p_0$ . Відмітимо, що при  $p_0 \rightarrow 0$  перший діапазон ймовірностей  $p$  звужується і мінімальне значення ціни гри збільшується. Звідси виходить, що дія завад розширює діапазон прийняття рішення  $S_2$  і дає наступне мінімальне значення ціни гри:

$$\min \mathcal{G} = \frac{1}{3-2p_0} [f + 2t(1-2p_0)]. \quad (17)$$

При досить великих ймовірностях  $p$ , що визначаються (16), з'являється оптимальна стратегія:

прийняття рішення  $S_1$  при будь-якому прийнятому сигналі і будь-яких діях  $S_2$ . Цікаво відмітити, що така стратегія є оптимальною лише при наявності завад. Дійсно при  $p_0 = 0$  третій діапазон рішень просто зникає.

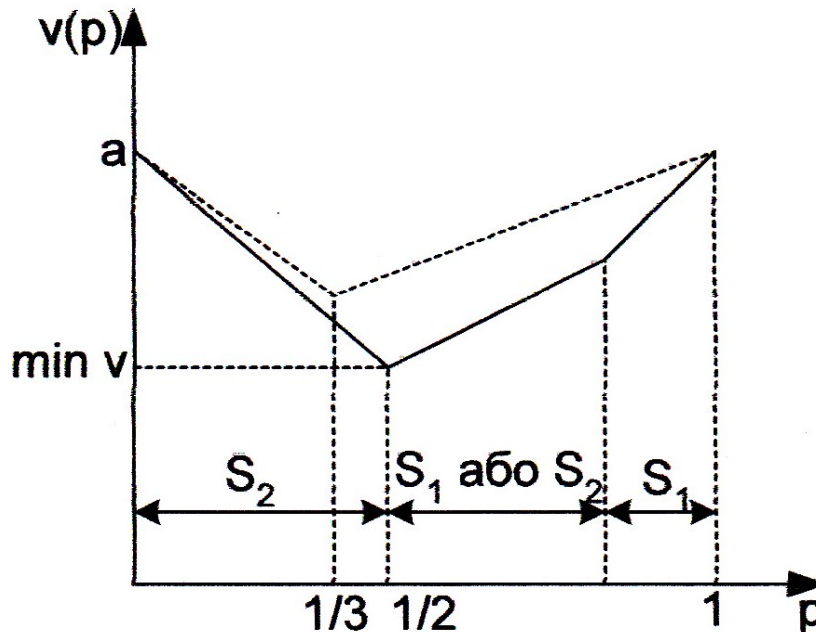


Рис. 2. Залежності ціни гри від  $\mathcal{G}$  імовірності  $p$ .

Діапазон (11) найбільш невизначений. Оптимальна стратегія передбачає випадкову комутацію сигналів джерела  $S_1$ , тим самим забезпечується найбільша невизначеність для вибору стратегій джерелом  $S_2$ . На відміну від інших діапазонів, тут ціна гри залежить від параметра  $p_0$ .

Таким чином, рішення задачі дозволяє обґрунтовано вибрати стратегії системи спостереження та оцінити в кожному випадку її ефективність.

На рис.2 вказані діапазони та характер прийнятих рішень. Для порівняння пунктиром відмічена залежність ціни гри за відсутності завад.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Вирішена актуальна наукова задача підвищення якості функціонування інформаційного забезпечення супутникових радіонавігаційних систем в умовах невизначеності завад при передачі сигналів. Задача вирішена шляхом поєднання методів динамічного розподілу потоків інформації та адаптивного динамічного управління чергами заявок у вузлах інформаційної мережі.

2. Розроблена методика базується на застосуванні імовірнісно-ігрових методів розподілу потоків інформації у поєднанні з використанням адаптивної системи управління чергами заявок на основі комплексного критерію оцінки пріоритетів з використанням похідної функції пріоритету. Такий підхід дозволив максимально скоротити час перебування інформаційної заявки в мережі і, як наслідок зменшити імовірність втрати актуальності коригувальних даних.

3. Для дослідження завадостійкості використовуваних сигналів СРНС було запропоновано модель передачі фазоманіпульованих шумоподібних сигналів СРНС, що дозволяє на достатньому рівні точності відтворити процеси функціонування основних структурних блоків телекомунікаційного забезпечення СРНС. Передбачена можливість розглядати різноманітні методи перетворення частоти сигналу в передавачі та варіанти обробки сигналу на приймальній стороні, що дозволяє здійснити оптимізацію структури та принципів функціонування вихідного тракту передавача та вхідного тракту приймача. Модель дозволяє врахувати вплив природних і умисних завад на досліджуваний сигнал.

### Література

1. Основи навігаційного забезпечення збройних сил: Підручник [М. А. Явтушенко, С.В. Козелков та ін.] / За ред. В.Б. Толубко. – Київ: ТС ЗСУ, 2004. – 209 с
2. Бабак В. П. Супутникова радіонавігація / В. П. Бабак, В. В. Конін, В. П. Харченко. – Київ: Техніка, 2004. – 327 с.

3. Руководство по требуемым навигационным характеристикам (RNP): ICAO. Doc 9113-AM/937. – Монреаль, 1994. – 46 с.
4. Аналіз світових тенденцій розвитку навігації для сухопутних військ / [В. М. Корольов, Е. В. Лучук, Я. Г. Заєць та ін.] // Військово-технічний збірник. – 2011. – №1. – С. 19–29.
5. Dorf R. Modern control systems / R. Dorf, R. Bishop. – Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2011. – 1111 p. – (12).

#### References

1. Osnovy navihatsiinoho zabezpechennia zbroinykh syl: Pidruchnyk [M. A. Yavtushenko, S.V. Kozelkov ta in.] / Za red. V.B. Tolubko. – Kyiv: TS ZSU, 2004. – 209 s
2. Babak V. P. Suputnykova radionavihatsiia / V. P. Babak, V. V. Konin, V. P. Kharchenko. – Kyiv: Tekhnika, 2004. – 327 s.
3. Rukovodstvo po trebuyemym navyhatsyonnym kharakterystykam (RNR): ISAO. Dos 9113-AM/937. – Monreal, 1994. – 46 s.
4. Analiz svitovykh tendentsii rozvytku navihatsii dlia sukhoputnykh viisk / [V. M. Korolov, E. V. Luchuk, Ya. H. Zaiets ta in.] // Viiskovo-tekhnichnyi zbimyk. – 2011. – №1. – S. 19–29.
5. Dorf R. Modern control systems / R. Dorf, R. Bishop. – Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2011. – 1111 p. – (12).