

І.В. СВИД, канд. техн. наук, М.Г. ТКАЧ, І.І. ОБОД, д-р техн. наук

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ «СВІЙ-ЧУЖИЙ»

Вступ

Інформаційне забезпечення системи контролю повітряного простору [1] вирішується головним чином радіолокаційними системами спостереження, до яких відносяться первинні [2 – 4], вторинні [5 – 8] радіолокатори, а також системи радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий» (IFF) [9 – 16]. В теперішній час існують дві системи радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий» «Пароль» [17] та МкХІІА [18 – 22]. При цьому слід зазначити, що перша з вказаних систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий» працює в частотному діапазоні, який відрізняється від частотного діапазону роботи систем вторинної радіолокації, то друга працює в частотному діапазоні вторинної радіолокації. Однак, як показано в роботах [23, 24], один з головних інформаційних ресурсів системи контролю повітряного простору побудовано на принципах одноканальної чи двоканальної системи передачі інформації. Це дозволяє зацікавленій стороні несанкціоноване використовувати цей інформаційний ресурс для подальшого визначення координат повітряних об'єктів, з одного боку, та перекручувати інформацію цих інформаційних ресурсів, з другого боку, що призводить до непередбачуваних результатів.

Мета роботи – оцінка завадозахищеності існуючих систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий».

Тенденції розвитку та коротка характеристика систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий»

Система IFF МкХІІА є розвитком раніше впроваджених систем IFF МкХА та IFF МкХІІ, забезпечуючи розширені можливості ідентифікації «свій-чужий» (IFF) при збереженні сумісності з цивільними системами вторинної радіолокації.

Так, у 1980-х роках було додано новий цивільний режим Mode S, який дозволяв кодувати у сигналі відповіді значно більшу кількість інформаційних даних. Це використовувалося для кодування розташування повітряного об'єкта (ПО), використовуючи дані з навігаційної системи. Це основна частина системи запобігання зіткнень, яка дозволяє комерційним ПО дізнаватися про місцезнаходження інших ПО у цьому районі та уникати їх, не вдаючись до наземних операторів. Розвиток режиму S призвів до створення технології ADS-B [25, 26].

Основні концепції режиму ADS-B було воєнізовано як режим 5, який є просто криптографічною закодованою версією координатних даних режиму S. Новостворена система IFF ХІІА є розвитком створених систем IFF МкХА та IFF МкХІІ, забезпечує розширені можливості процесу ідентифікації «свій-чужий» зі збереження сумісності з цивільними вторинними радіолокаторами спостереження (SSR). STANAG 4193 (Частина ІІ) визначає встановлені характеристики системи IFF МкХІІА. Вимоги, застосовні до будь-якої конкретної категорії обладнання, вказані у стандарті STANAG 4193 (частина І), який описує систему IFF МкХІІА та визначає загальні характеристики системи. Класифіковані характеристики системи IFF МкХІІА визначені STANAG 4193 (частина ІІ). У додатку до STANAG 4193 (Частина ІІІ) визначаються відповідні функціональні вимоги та вимоги до характеристик, які застосовуються до обладнання запитувача і відповідача. Встановлені вимоги вважаються мінімально необхідними для забезпечення належних загальних характеристик системи IFF [18].

В даний час авіація країн НАТО оснащена системою IFF МкХІІА, в якій додатково використовується імітостійкий режим Mode 5. Особливостями сигналів режиму Mode 5 є наявність опорної групи імпульсів з часово-імпульсною модуляцією, що визначає режим ідентифікації, та частотна модуляція з безперервною фазою імпульсів преамбули і подавлен-

ня бічних пелюсток 16-розрядною послідовністю коду Уолша, котра використовується при декодуванні інформаційної групи.

Сигнал режиму Mod5 аналітично може бути представлено так:

$$S_{m5}(t) = A \sum_{n=0}^3 s_1(t-t_n, k)p(t-t_n) + A_p s_1(t-t_p, k)p(t-t_p) + A \sum_{m=0}^{M-1} s_1(t-t_n, k)p(t-t_m),$$

де $p(t-t_n) = \{1 | t_i \in [t_0 + iNT, t_0 + (i+1)NT]; 0 | \notin [t_0 + iNT, t_0 + (i+1)NT]\}$; A та A_p – амплітуди імпульсів преамбули та подавлення бічних пелюсток; t_n та t_p – моменти часу появи імпульсів преамбули та подавлення бічних пелюсток; t_m – моменти часу появи m -го імпульсу з M

імпульсів інформаційної групи; $s_1(t, k) = \sum_{i=0}^{N-1} U_m \cos\left(2\pi f_s t + \frac{\pi b_i(k)}{2T} + \varphi_i\right)$, $t_0 \leq t \leq t_0 + NT$ – частотне представлення імпульсу сигналу запиту (СЗ) частотно-маніпульованою 16-розрядною послідовністю Уолша; U_m – амплітуда сигналу; t_0 – час початку сигналу; $N=16$ – кількість елементів в сигналі; T – тривалість елемента (посилки) сигналу; f_s – несійна частота сигналу; $b_i(k) = \text{sgn}(\text{wal}(k, \theta_i))$ – знак i -го елемента послідовності на інтервалі часу $[t_0 + iT, t_0 + (i+1)T]$; $\text{wal}(k, \theta)$ – функція Уолша за номером k , яка визначена на інтервалі $[0, NT]$; $\theta_i = t_i / NT = i / N$, $\theta_i \in [0, 1]$ – безрозмірний час, в моменти якого формується значення

$b_i(k) \in \{-1; 1\}$; $\varphi_i = \frac{\pi}{2} - \sum_{j=1}^{i-1} b_j - \frac{(i-1)\pi}{2} b_i + \varphi_s$; φ_s – початкова фаза сигналу; $\beta = \Delta f T = 0.5$ індекс модуляції; Δf – рознос частот.

Імпульси преамбули можна представити в вигляді

$$g_k(t) = \sum_{n=1}^{L-1} a_k(n)p(t-nT),$$

де $p(t)$ – імпульс тривалості nT ; $a_k(n)$, $0 \leq n \leq L$ – кодова послідовність, яка визначає розстановку імпульсів преамбули за часом.

Слід зазначити, що в режимі Mode 5 головними є підрежими M5L1 (імітостійка ідентифікація) та підрежим M5L2 (підтримка функцій ADS-B). Різниця підрежимів ідентифікації проводиться аналізом розстановки імпульсів преамбули в часі. Для підрежиму M5L1 потрібна наявність імпульсу P_2 та імпульсу P_1 , а для M5L2 – щонайменше три імпульси з чотирьох. При цьому імпульс P_1 є «опорним», щодо якого визначається часове розташування інших. Якщо позначити наявність/відсутність імпульсу логічної змінної P_i , то логіку прийняття рішення про підрежим ідентифікації можна представити у виді

$$\begin{cases} P_{M5L1} \leftrightarrow P_1 P_2 \\ P_{M5L2} \leftrightarrow (P_1 P_2 P_3 P_4) \vee (\bar{P}_1 P_2 P_3 P_4) \vee (P_1 \bar{P}_2 P_3 P_4) \vee (P_1 P_2 \bar{P}_3 P_4) \vee (P_1 P_2 P_3 \bar{P}_4) \end{cases}$$

де наявність імпульсів на очікуваних часових позиціях визначається підрежимом ідентифікації.

Антенна система відповідача ПО утворена значною кількістю слабо спрямованих антен, що розширює можливості щодо оптимізації обробки даних відповідачів ПО за часовими та просторовими параметрами.

В даний час широко використовуються дві системи ідентифікації: MkXIIA і «Пароль» [17], які використовують різні частотні діапазони. Система IFF «Пароль» реалізована за прин-

ципом запитальних асинхронних безадресних систем [17], а радіолокаційна система IFF MkXIIA відноситься до беззапитальних систем [20].

Розглянемо порівняльну завадозахищеність систем IFF на прикладі існуючих систем ідентифікації ПО за ознакою «свій-чужий».

Під завадостійкістю будемо розуміти здатність інформаційного засобу виконувати свої функції з необхідними показниками якості за наявності ненавмисних і навмисних завад.

Під прихованістю системи будемо розуміти неможливість радіорозвідки визначити місце розташування інформаційного засобу за межами зони його видимості.

Завадостійкість та прихованість сумісно визначають завадозахищеність.

Під можливістю несанкціонованого використання будемо розуміти можливість безпосереднього або шляхом запиту використання сигналів чи інформації розглянутого засобу.

Принцип побудови існуючих запитальних систем IFF зумовив широкі можливості зацікавленої сторони, як у подавленні запитальних IFF в системному плані, так і в отриманні інформації шляхом несанкціонованого включення відповідача ПО [27 – 29].

Використання в якості сигналів запиту і відповіді інтервально-часового та позиційного кодів [30 – 32], тобто використання сигналів без внутрішньоімпульсної модуляції та випромінювання сигналу відповіді слабко спрямованою антенною системою зумовили широке використання відповідача ПО системами радіорозвідки зацікавленої сторони як одного з основних інформаційних джерел.

Нижче покажемо, що такі принципи побудови радіолокаційних систем IFF обумовлюють низьку завадозахищеність існуючих радіолокаційних систем IFF [33 – 35], тобто невисоку завадостійкість та практично відсутність енергетичної прихованості роботи відповідача ПО [36 – 38].

Оцінка завадостійкості запитальних систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий»

Мережа запитальних радіолокаційних систем IFF за принципом побудови відноситься до несинхронних, що означає, по-перше, відсутність синхронізації за часом випромінювання СЗ окремих запитувачів та, по-друге, відсутність будь-якої часової синхронізації між різними системами ідентифікації.

Відповідачі запитальних радіолокаційних систем IFF за принципом обслуговування сигналів запиту відносяться до систем масового обслуговування (СМО) з обслуговуванням першого правильно прийнятого СЗ.

За принципом побудови відповідачі відносяться до одноканальних СМО з відмовами. Суть цих систем полягає в тому, що при обслуговуванні заявки (СЗ) відповідач радіолокаційних систем IFF закривається на певний час, який називають часом паралізації. Величина часу паралізації залежить від режиму роботи. Наявність часу паралізації відповідача ПО обмежує завадостійкість, як самого відповідача, так і радіолокаційних систем IFF у цілому. Оскільки відповідачі обслуговують будь-який правильно прийнятий запит (навіть імітований зацікавленою стороною), то вони належать до відкритих СМО. Наявність тільки одного каналу обслуговування СЗ та паралізація відповідача ПО при обслуговуванні СЗ дозволяє віднести відповідача ПО до одноканальної відкритої СМО з відмовами. Будемо враховувати, що завадостійкість запитальної системи IFF характеризує імовірність виявлення повітряного об'єкту радіолокаційною системою IFF P_s , яку визначають як імовірність отримання потрібного числа сигналів відповіді на запити запитальної радіолокаційної системи IFF, яка розглядається. Розглянемо залежність цього показника P_s від інтенсивності завад.

Наземний радіозапитувач прийме сигнал відповіді від відповідача ПО тоді і тільки тоді, якщо одночасно відбудуться дві події:

- відповідач ПО прийме, правильно декодує сигнал запиту і сформує сигнал відповіді (імовірність цієї події дорівнює завадостійкості відповідача ПО P_0);
- сигнал відповіді відповідача ПО прийме та виявить наземний радіозапитувач.

Розглянемо імовірності цих двох подій при наявності завад та проаналізуємо імовірність одночасного їх виконання.

Будемо вважати, що сумарний потік завад утворюється потоком СЗ сусідніх систем IFF, потоком навмисних корельованих завад від зацікавленої сторони та потоком хаотичних імпульсних завад (навмисних та ненавмисних некорельованих завад). Розрахунки проведемо для сумарного потоку сигналів неімітостійких та імітостійких режимів роботи радіолокаційних систем IFF за ознакою «свій-чужий» і для існуючих алгоритмів виявлення ПО. Цей алгоритм полягає в проведенні ідентифікації ПО на першому етапі в неімітостійкому режимі, і за позитивним результатом здійснюється перехід до другого етапу – ідентифікації за ознакою «свій-чужий» в імітостійкому режимі. Крім того, при оцінці завадостійкості будемо оцінювати вклад різних небажаних ситуацій у сумарну оцінку завадостійкості систем IFF.

Проведемо оцінку завадостійкості відповідачів запитальних систем IFF при спільній дії потоків сигналів запиту та хаотичної імпульсної завади.

Вплив потоку СЗ призводить, як показано вище, до паралізації літакового відповідача на час паралізації, який визначається режимом запиту. Зазначимо, що при прийманні СЗ за основною пелюсткою діаграми спрямованості антени запитувача відповідач ПО повністю паралізується на час обслуговування, а при прийманні СЗ за бічними пелюстками діаграми спрямованості антени запитувача відповідач ПО паралізується на час між імпульсом СЗ, амплітуда якого запам'ятовується, і імпульсом подавлення бокових пелюсток. Хаотична імпульсна завада (ХІЗ) (навмисна або ненавмисна) впливає на роботу відповідача ПО:

- по-перше, подавляє окремі імпульси СЗ, що робить неможливим обслуговування даного СЗ;
- по-друге, паралізує роботу відповідача ПО через утворення хибних СЗ (хибна тривога першого і другого роду).

Оцінимо завадостійкість відповідача ПО при впливі вказаних завад. При надходженні на вхід відповідача ПО потоків СЗ і ХІЗ відповідач не сформує сигнал відповіді, якщо станеться хоча б одна з таких несприятливих ситуацій:

- СЗ даного запитувача подавиться через утворення з ХІЗ випереджаючих хибних СЗ (хибна тривога першого роду), які призводять до випромінювання сигнал відповіді або спрацьовування схеми подавлення бокових пелюсток (імовірність P_1);
- сигнал запиту даного запитувача подавиться через випереджаючі СЗ сусідніх запитувачів або запитувачів зацікавленої сторони (імовірність P_2);
- окремі імпульси коду запиту даного запитувача подавляться на високій частоті через збіг за часом імпульсів різних СЗ при несприятливих фазових співвідношеннях (імовірність P_3);
- СЗ даного запитувача подавиться через випереджаючі хибні СЗ, що утворюються при взаємодії першого імпульсу СЗ даного запитувача з випереджаючими (на базу коду) імпульсами ХІЗ або СЗ (хибна тривога другого роду) і призводять до випромінювання сигнал відповіді або спрацьовування схеми подавлення бокових пелюсток (імовірність P_4);
- СЗ даного запитувача подавиться через появу на позиції сигналу хибного імпульсу подавлення, який утворився з завад (імовірність P_5);
- сигнал запиту подавиться через спрацьовування схеми часової селекції відповідачів (імовірність P_6);
- СЗ подавиться через інерційність схем вхідних формувачів дешифратора і обмеження завантаження відповідача (імовірність P_7).

Визначимо, що імовірність цих подій в припущенні, що потоки СЗ і ХІЗ впливають на коди запитів даного запитувача незалежно один від одного і кількість джерел, що формують загальний потік СЗ, достатньо велика для характеристики потоку як пуасонівського.

Нехай на вхід відповідача поступають:

- потік ХІЗ інтенсивністю λ_0 ;

- потік СЗ інтенсивністю λ_1 , який включає потоку СЗ сусідніх запитувачів і потоку СЗ, імітованих зацікавленою стороною;
- потік СЗ, які викликають спрацьовування схеми подавлення бічних пелюсток, інтенсивністю λ_2 .

Припустимо, що тривалість імпульсів потоку СЗ однакова, незмінна за часом і збігається з тривалістю імпульсів корисного сигналу. Припустимо також, що загальні потоки СЗ складаються з k частин неімітостійкого режиму та $(1-k)$ частин імітостійкого режиму.

Сумісна дія ХІЗ і потоку СЗ призводить до високочастотного подавлення окремих імпульсів потоку СЗ при несприятливих фазових співвідношеннях, внаслідок чого інтенсивність потоку СЗ зменшується.

Імовірність того, що хоча б один імпульс ХІЗ збіжиться за часом з імпульсом потоку СЗ і подавить його, становить:

$$P_p = \gamma(1 - e^{-\lambda_0 \tau_0}),$$

де γ – коефіцієнт інтерференційного подавлення, який визначає імовірність інтерференційного подавлення імпульсу прийнятого сигналу запиту при його збіжності за часом з імпульсом завади.

Через високочастотне подавлення зменшується інтенсивність потоку СЗ, які викликають випромінювання сигнал відповіді $\lambda_1^1 = \lambda_1(1 - P_p)^n$ та інтенсивність потоку СЗ, які викликають спрацьовування схеми подавлення бокових пелюсток $\lambda_2 = \lambda_2(1 - P_p)^n$, де n – значність коду сигналів запиту.

Імовірність того, що хоча б один СЗ потрапить в випереджаючий інтервал і подавить СЗ даної радіолокаційної системи IFF за рахунок часу паралізації t_1 відповідача ПО в неімітостійкому режимі при випромінюванні сигнал відповіді, визначається відповідно:

$$\text{від ХІЗ: } P_1^1 = 1 - e^{-\lambda_x t_1}, \quad \text{від потоку СЗ: } P_1^2 = 1 - e^{-k \lambda_1 t_1},$$

де λ_x – середня кількість хибних n -імпульсних кодів, що призводять до випромінювання сигналу відповіді; $k = \lambda_n / \lambda_1$ – відносна частка неімітостійкого режиму в загальній інтенсивності потоку СЗ; λ_n – інтенсивність потоку СЗ неімітостійкого режиму.

Середню кількість хибних n -імпульсних кодів, які призводять до випромінювання сигналу відповіді, можна визначити за формулою

$$\lambda_x = n \tau_0^n \lambda_0^{n-1} (1 - \tau_s / \tau_0),$$

де τ_s – задана тривалість селекції імпульсів за часом.

Імовірність того, що хоча б один СЗ потрапить в випереджаючий інтервал і подавить СЗ даної запитальної системою IFF за рахунок часу паралізації t_2 відповідача ПО в імітостійкому режимі при випромінюванні сигнал відповіді, визначається відповідно:

$$\text{від ХІЗ: } P_1^3 = 1 - \exp(-\lambda_x t_2), \quad \text{від потоку СЗ: } P_1^4 = 1 - \exp[-(1-k)\lambda_1 t_2].$$

Результуюча імовірність подавлення СЗ даного запитувача системи через паралізацію відповідача при випромінюванні сигнал відповіді складає

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_1^i).$$

Тут і далі розрахунки проведено за умови, що інтенсивність λ_1 потоку СЗ, випромінюваних за бічними пелюстками діаграми спрямованості антени запитувача, в три рази переви-

щує інтенсивність λ_0 потоку СЗ, випромінюваних за основним пелюсткою діаграми спрямованості антени запитувача.

Імовірність P_2 того, що хоча б один СЗ попаде в випереджаючий інтервал і подавить СЗ даної радіолокаційної системи IFF за рахунок часу паралізації t_3 відповідача ПО при спрацьовуванні схеми подавлення бокових пелюсток в неімітостійкому режимі, визначається відповідно:

$$\text{від ХІЗ: } P_2^1 = 1 - e^{-\lambda_s t_3}, \quad \text{від потоку СЗ: } P_2^2 = 1 - e^{-k\lambda_2 t_3}.$$

Імовірність того, що хоча б один СЗ попаде в випереджаючий інтервал і подавить СЗ даної радіолокаційної системи IFF за рахунок часу паралізації t_4 відповідача ПО при спрацьовуванні схеми подавлення бокових пелюсток в імітостійкому режимі, визначається відповідно:

$$\text{від ХІЗ: } P_2^3 = 1 - e^{-\lambda_s t_4}, \quad \text{від потоку СЗ: } P_2^4 = 1 - e^{-(1-k)\lambda_2 t_4}.$$

Результуюча імовірність подавлення СЗ даного запитувача радіолокаційної системи IFF через паралізацію відповідача при прийманні СЗ по бічних пелюстках діаграми спрямованості антени запитувача становить:

$$P_2 = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_2^i).$$

Імовірність подавлення одного будь-якого імпульсу СЗ даного запитувача через збіжність з імпульсами потоків ХІЗ і СЗ становить

$$P_{10} = \gamma \left[1 - e^{-\lambda_s \tau_0} \right],$$

де $\lambda_s = \lambda_0 + \lambda_1^1 + \lambda_2^1$ – інтенсивність сумарного потоку завад та СЗ.

З урахуванням n імпульсів СЗ імовірність подавлення сигналу запиту складає

$$P_3 = 1 - (1 - P_{10})^n.$$

Імовірність P_4 подавлення СЗ даного наземного радіозапитувача через появу випереджаючих хибних кодів запиту, що утворюються в результаті взаємодії першого імпульсу коду запиту з випереджаючими імпульсами потоку СЗ і призводять до випромінювання сигналу відповіді або спрацьовування схеми подавлення бічних пелюсток, визначається співвідношенням

$$P_4 = (1 - P_{01})^n \left[1 - (1 - P_{10})^{n+1} \right].$$

Другий співмножник враховує можливі ситуації утворення хибних випереджаючих кодів запиту: n кодів запиту, що призводять до випромінювання коду відповіді, і одного коду сигналу подавлення, який призводить до спрацьовування схеми подавлення бокових пелюсток.

Імовірність хибної тривоги другого роду P_{01} визначається за формулою

$$P_{01} = 1 - e^{-\lambda_s \tau_0}.$$

Імовірність P_5 подавлення запиту даного запитувача через появу на позиції сигналу хибного імпульсу подавлення, який утворився з завад, визначається за формулою

$$P_5 = (1 - P_{10})^n P_{01}^{n-1}.$$

Імовірність P_6 подавлення СЗ в результаті спрацьовування схем часової селекції відповідачів визначається співвідношенням

$$P_6 = 1 - e^{-2\lambda_s \tau_0}.$$

Імовірність P_7 подавлення кодів запиту через інерційність вхідних формувачів відповідача ПО визначається за формулою

$$P_7 = 1 - (1 - P_f)^n,$$

де $P_f = 1 - e^{-\lambda_s \tau_f}$ – імовірність подавлення одного імпульсу коду через інерційність формувача.

З аналізу ймовірностей несприятливих ситуацій, що призводять до подавлення СЗ наземного запитувача, видно, що максимальною є імовірність P_1 подавлення СЗ даного запитувача радіолокаційної системи IFF через утворення з ХІЗ випереджаючих хибних СЗ. Приблизно втричі меншою є імовірність P_2 подавлення СЗ запитувача радіолокаційної системи IFF через випереджаючі СЗ сусідніх запитувачів або запитувачів зацікавленої сторони. Імовірності всіх інших несприятливих ситуацій є незначними порівняно з імовірністю P_1 .

Якщо середня кількість СЗ перевищує припустиму величину завантаження відповідача λ_i , то імовірність відповіді при роботі схеми обмеження завантаження відповідача ПО зменшується і становить: $P_{lv} = \lambda_i / \lambda_3$, де $\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2$.

Імовірність випромінювання відповіді відповідачем ПО на запит даної запитальної системою IFF становить:

$$\text{при } \lambda_3 < \lambda_M, \quad P_0 = \prod_{i=1}^7 (1 - P_i), \quad \text{при } \lambda_3 > \lambda_M \quad P_0 = P_{lv} \prod_{i=1}^7 (1 - P_i).$$

Розрахунки за наведеними виразами подано на рис. 1. При цьому вважали, що інтенсивність потоку ХІЗ $\lambda_0 = 0; 2 \cdot 10^4; 4 \cdot 10^4$, а інтенсивність λ_1 потоку СЗ, які призводять до випромінювання сигналу відповіді, в п'ять разів менше інтенсивності λ_2 потоку СЗ, які викликають спрацьовування схеми подавлення бічних пелюсток.

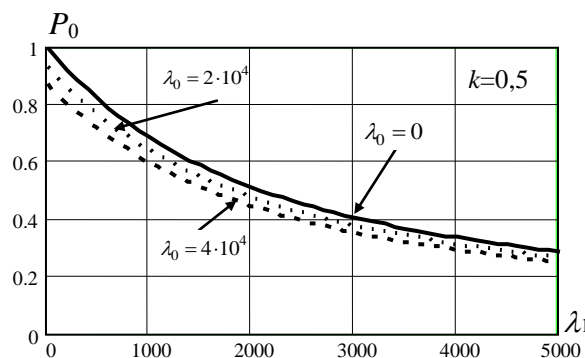


Рис. 1. Оцінка завадостійкості відповідача ПО запитальної системи IFF

З наведених результатів можна зробити такі висновки:

1. Збільшення інтенсивності потоку СЗ призводить до різкого зниження завадостійкості відповідача ПО, що вказує на низьку завадостійкість відповідача ПО (а також систем IFF в цілому). Некорельовані завади (ХІЗ) порівняно слабо впливають на КГ відповідача ПО. Так, при $k = 0,5$ і наявності потоку СЗ $\lambda_1 = 5000$ вплив інтенсивних некорельованих завад

($\lambda_0 = 40000$) призводить до порівняно незначного зниження КГ відповідача ПО з 0,3 до 0,27. Це означає, що найбільш небезпечною для радіолокаційної системи IFF є навмисна корельована завада. Ця обставина дозволяє стверджувати, що основним видом завад при подавленні систем IFF у системному плані є постановка навмисних корельованих завад. З наведеного розрахунку виходить, що інтенсивність потоку СЗ, яка дорівнює 5000, що потребує вилученню 10000 імпульсів, більш ніж на порядок ефективніше за вилучення 40000 імпульсів некорельованої завади.

2. Збільшення частки імітостійкого режиму в загальному потоку СЗ призводить до суттєвого зниження завадостійкості відповідача ПО. Так, при відсутності ХІЗ ($\lambda_0 = 0$) та при інтенсивності потоку СЗ $\lambda_1 = 4000$ збільшення частки імітостійкого режиму з 0,5 до 0,9 призводить до зменшення КГ відповідача ПО майже втричі – з 0,35 до 0,12.

Наведена оцінка завадостійкості показує, що відповідач ПО, як правило, не досягає максимального завантаження. Дійсно, у відповідача ПО для підвищення завадостійкості обмежують максимальну кількість відповідей: в радіолокаційних систем IFF "Пароль" вона збільшена до 3500. Але наведені розрахунки показують, що кількість відповідей відповідача ПО ніколи не сягає такого великого значення. Це вказує на неправильне визначення коефіцієнта завантаження, через що відповідачі ПО існуючих систем IFF не будуть відсіювати СЗ малої потужності. Неправильне визначення максимального завантаження відповідача ПО призводить до зниження завадостійкості відповідача ПО і запитальної системою IFF в цілому. Зацікавлена сторона може несанкціоновано запитувати відповідач ПО і отримувати від нього інформацію або паралізувати його застосуванням завад потрібної інтенсивності за допомогою одного запитувача, розташованого на значній відстані.

Таким чином, наведена оцінка завадостійкості відповідача ПО вказує на низьку стійкість відповідача ПО до впливу навмисних корельованих завад і дозволяє оцінити пропускну здатність існуючих систем IFF.

Оцінка завадостійкості запитальної радіолокаційної системи IFF при сумісній дії потоків сигналів запиту та хаотичної імпульсної завади у каналі запиту та відповіді

Будемо вважати, що апаратура оброблення запитувача реалізує двоетапний алгоритм квазіоптимального виявлення пачки сигналу відповіді, а коефіцієнт готовності відповідача ПО постійний в межах всієї пачки сигналу відповіді. На вхід приймача наземного запитувача надходять незалежні потоки ХІЗ в каналі відповіді інтенсивністю λ_0 та потік сигналу відповіді.

При відсутності завад імовірність виявлення пачки сигналу відповіді запитувачем, тобто повітряного об'єкту радіолокаційними системами IFF, при застосуванні логіки " k із M " визначається за формулою

$$P_s = \sum_{i=k}^M C_M^i P_0^i (1 - P_0)^{M-i},$$

де $C_M^i = (M! / i!(M - i)!)$ – біноміальні коефіцієнти.

Наявність ХІЗ в радіоканалі відповіді призводить до подавлення окремих імпульсів сигналу відповіді. Сигнал відповіді не буде прийнятий наземним запитувачем, якщо станеться хоча б одна з таких подій:

– сигнал відповіді відповідача ПО буде подавлений на високій частоті через збіжність за часом імпульсів ХІЗ і сигнал відповіді при несприятливих фазових співвідношеннях (імовірність P_8);

– сигнал відповіді подавиться в результаті інерційності схем оброблення прийнятих сигналів (імовірність P_9).

Імовірність P_8 високочастотного подавлення сигналу відповіді через збіжність за часом імпульсів ХІЗ і сигналу відповіді при несприятливих фазових співвідношеннях, за аналогією з імовірністю P_3 , визначається за формулою

$$P_8 = 1 - (1 - P_{10})^n,$$

де $P_{10} = \gamma \left[1 - e^{-\lambda_s^{pr} \tau_0} \right]$ – імовірність того, що хоча б один імпульс з потоку сигналу відповіді збіжиться за часом з імпульсом ХІЗ і через несприятливі фазові співвідношення буде подавлений; $\lambda_s^{pr} = \lambda_0 + \lambda_1 P_0$ – інтенсивність сумарного потоку ХІЗ та сигналів відповіді у каналі відповіді.

Імовірність P_9 подавлення сигналу відповіді в результаті інерційності схем оброблення прийнятих сигналів визначається за наступним виразом:

$$P_9 = 1 - (1 - P_f^{pr})^n,$$

де $P_f^{pr} = 1 - e^{-\lambda_s^{pr} \tau_f}$ – імовірність подавлення одного імпульсу коду через інерційність схеми оброблення прийнятого сигналу.

Тоді імовірність P_{pr} подавлення сигналу відповіді можливо обчислити як

$$P_{pr} = 1 - \prod_{i=8}^9 (1 - P_i),$$

а імовірність виявлення ПО за пачкою сигналів відповіді запитувачем з урахуванням впливу ХІЗ визначається за формулою

$$P_s = \sum_{i=k}^M C_M^i \left(\left[(1 - P_{pr}) P_0 \right]^i \left[1 - (1 - P_{pr}) P_{pr} \right] P_0 \right)^{M-i}.$$

Залежність імовірності виявлення ПО P_s радіолокаційних систем IFF від інтенсивності λ_1 потоку СЗ, яка призводить до випромінювання сигналу відповіді, наведено на рис. 2.

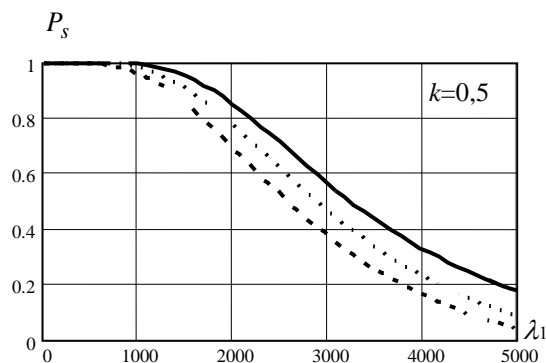


Рис. 2. Залежність $P_s = f(\lambda_1, \lambda_0, k)$

При розрахунках вважали, що інтенсивність λ_1 потоку СЗ, яка призводить до випромінювання сигналу відповіді, в п'ять разів менше інтенсивності λ_2 потоку СЗ, яка викликає спрацьовування схеми подавлення бокових пелюсток, інтенсивність потоку ХІЗ в каналі відповіді $\lambda_0 = 10^4$. Залежності наведено для різних коефіцієнтів неімітостійкості k та інтенсивності потоку ХІЗ в каналі запиту $\lambda_0 = 0; 2 \cdot 10^4; 4 \cdot 10^4$.

З порівняння рис. 2 видно, що збільшення в сумарному потоку СЗ частки імітостійкого режиму призводить до істотного зниження імовірності виявлення ПО запитальною системою IFF. Так, при $\lambda_1 = 3000$ та $\lambda_0 = 2 \cdot 10^4$ збільшення в сумарному потоці СЗ частки імітостійкого режиму з 0,5 ($k = 0,5$) до 0,9 ($k = 0,1$) призводить до зниження P_s з 0,48 до 0,03. Це означає, що введення імітостійкого режиму дійсно дозволило виключити імітацію сигналу «Я свій» зацікавленою стороною. Але застосування зацікавленою стороною навмисної корельованої завади призведе до паралізації відповідача ПО, що робить неможливим визначення державної приналежності виявлених повітряних об'єктів.

Наведені розрахунки завадостійкості систем IFF показали суттєву залежність імовірності виявлення ПО від наявності та інтенсивності навмисних корельованих завад, імітованих зацікавленою стороною. Невірний вибір коефіцієнта завантаження відповідача ПО радіолокаційної системи IFF «Пароль» дозволяє зацікавленій стороні паралізувати роботу радіолокаційної системи IFF імітованими сигналами запиту малої потужності, тобто на повній відстані, визначеній прямою видимістю.

Оцінка енергетичної прихованості відповідачів ПО запитальних систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий»

Оцінимо енергетичну прихованість відповідача ПО за критерієм дальності виявлення сигналів відповіді. В якості системи радіотехнічної розвідки розглянемо різницево-далекомірну систему, яка включає три приймальних пункти.

Система радіотехнічної розвідки здатна вирішити координатну задачу при виявленні на всіх приймальних пунктах одного імпульсу сигналу відповіді ($n = 1$) або всього сигналів відповіді $n = 2$ чи $n = 3$. Ця можливість закладена у структурі сигналу відповіді, в якості яких, як правило, використовують систему сигналів незначного об'єму. Дійсно, кількість сигналів відповіді існуючих систем IFF відома, тривалість імпульсів, які входять до сигналів відповіді, також відома. Ці обставини дозволяють зацікавленій стороні здійснювати виявлення не тільки окремих імпульсів сигналу відповіді систем IFF, а також і сигналів відповіді у цілому, при використанні, наприклад, багатоканальних виявлювачів, за рахунок апріорно відомих сигналів відповіді.

Позначимо довжину електромагнітних хвиль (EMX) λ , потужність передавача відповідача ПО P , коефіцієнт підсилення антени відповідача ПО G , ефективну площу приймальної антени A , порогову чутливість приймача $P_{pr\ min}$. Відповідач ПО збуджує в розкритті приймальної антени системи радіотехнічної розвідки, розташованої на відстані r від відповідача ПО, густину потоку потужності EMX $S_{pr} = PG / 4\pi r^2$. Потужність сигналу на вході приймача становить (без врахування поляризаційних втрат):

$$P_{pr} = S_{pr} A = PGA / 4\pi r^2. \quad (1)$$

Для виявлення сигналу відповіді необхідно, щоб відношення сигнал/шум перевищувало пороговий рівень. Відношення сигнал-шум оцінимо за формулою

$$q = \sqrt{P_{pr} / N_0}, \quad (2)$$

де $N_0 = kT(K_{ch} - 1)$ – спектральна густина потужності шумів, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) – стала Больцмана, K_{ch} – коефіцієнт шуму приймача, $T = 290$ – температура.

Дальність виявлення сигналу відповіді (за сигналами Мод 5) типового відповідача ПО системою радіотехнічної розвідки, розрахована за формулами (1), (2), наведена на рис. 3 (для $F = 10^{-6}$). Дальність виявлення розраховувалась для одного імпульсу сигналу відповіді та для сигналу відповіді цілком.

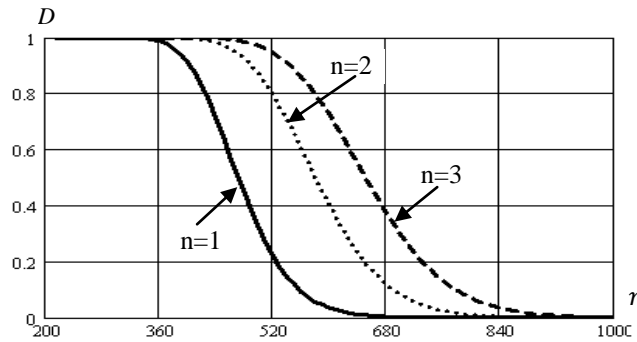


Рис. 3. Дальність виявлення сигналів систем IFF

Наведені розрахунки показують, що системи радіотехнічної розвідки здатні виявити сигнал відповіді сучасних відповідача ПО на великій дальності. Наприклад, дальність виявлення відповідача ПО всього за одним імпульсом сигналу відповіді з імовірністю $D=0,5$ становить 470 км, що відповідає дальності прямої видимості на висоті 12,4 км (при висоті підйому антени 10 м). Таким чином, зона виявлення сигналів відповіді відповідача ПО систем радіотехнічної розвідки, як правило, обмежується відстанню прямої видимості та значно перевищує зони виявлення первинних систем.

Представлені розрахунки дальності виявлення сигналів опорної групи імпульсів з часово-імпульсною модуляцією Mod 5 показують, що наявність у випромінюваних сигналах ідентифікації радіоімпульсів без внутрішньої модуляції доводить, що існуючі системи IFF MkXIIA позбавлені енергетичної прихованості і, як наслідок, не відносяться до завадозахищених. Дійсно, використання сигналів опорної групи, яка включає чотири імпульси преамбули з часово-імпульсною модуляцією, яка визначає підрежим ідентифікації, а також імпульсу подавлення бокових пелюсток дозволяє здійснювати обчислення координат повітряних об'єктів, які використовують зазначену систему IFF MkXIIA за рахунок використання технології WAM [39, 40].

Висновки

Розглянуто існуючі системи радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий» з точки зору оцінки завадозахищеності. Наведений аналіз завадозахищеності існуючих систем радіолокаційної ідентифікації об'єктів за ознакою «свій-чужий», побудованих на принципах запитальних та беззапитальних інформаційних систем, показав, що використання прямокутних радіосигналів з часово-імпульсною модуляцією у якості сигналів запиту та відповіді, які випромінюють повітряні об'єкти, має низьку завадозахищеність та виключає енергетичну прихованість відповідачів повітряних об'єктів і, як наслідок, надає можливість здійснювати несанкціоноване обчислення координат повітряних об'єктів зацікавленою стороною на основі випромінених сигналів ідентифікації за ознакою «свій-чужий».

Список літератури:

1. N. Ntombela and P. Umenne. Access Control with Automated on Duty Notification Tool in air traffic Services // Artificial Intelligence Big Data Computing and Data Communication Systems (icABCD) 2020 International Conference on, pp. 1-5, 2020. doi: 10.1109/icABCD49160.2020.9183828.
2. D. Cohen and Y. C. Eldar. Sub-nyquist radar systems: Temporal, spectral, and spatial compression // IEEE Signal Processing Magazine, vol. 35, no. 6, pp. 35 – 58, 2018. doi:10.1109/MSP.2018.2868137.
3. H. You, X. Jianjuan, and G. Xin. Radar Data Processing with Applications. 2016. doi: 10.1002/9781118956878.
4. X. Li and J. Du. Performance optimization algorithm of Radar Signal Processing System // Cluster Computing, vol. 20, no. 1, pp. 359 –370, 2016. doi: 10.1007/s10586-016-0710-6.
5. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. Москва : ЦИИТ, 1998. 118 с.
6. G. Jiang, Y. Fan and H. Yuan. Assessing the Capacity of Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar System // 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), Taiyuan, China, 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799146.

7. V. Andrusevich and I. Obod. Assessment of the quality of information support by Air Radar Surveillance Systems // *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 78–82, 2021. doi: 10.20998/2522-9052.2021.2.10.
8. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, I. Shtykh, G. Maistrenko, and G. Zavolodko. Comparative quality analysis of the air objects detection by the Secondary Surveillance Radar // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2019. doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783539.
9. X. Du, K. Liao and X. Shen. Secondary Radar Signal Processing Based on Deep Residual Separable Neural Network // 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 2020, pp. 12-16, doi: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202372.
10. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий» : монографія. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.
11. Obod I., Svyd I., Maltsev O. and Bakumenko B. Comparative Analysis of Noise Immunity Systems Identification Friend or Foe // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 751-756, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088856.
12. Sharifi-Tehrani O., Sadeghi A. and Razavi S. M. J. Design and Simulation of IFF/ATC Antenna for Unmanned Aerial Vehicle // *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, vol. 6, no. 1, Jun. 2017.
13. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Tkachova T. and Zavolodko G. Improving Noise Immunity in Identification Friend or Foe Systems // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 73-77, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879812.
14. Strelnytskyi O., Svyd I., Obod I., Maltsev O., Voloshchuk O. and Zavolodko G. Assessment Reliability of Data in the Identification Friend or Foe Systems. // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 728-731, doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783397.
15. S. Starokozhev, M. Tkach, A. Hlushchenko, O. Datsenko, M. Chernyshov and V. Chumak. Frequency Efficiency Evaluation of Query Airspace Surveillance Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2021, pp. 501-505, doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772190.
16. Порівняльний аналіз завадостійкості каналу передачі інформації вторинних радіолокаційних систем / І.В. Свид, І.Ю. Воргуль, С.В. Старокожев и др. // *Радіотехніка*. 2022. Вип. 208. С. 44 – 54. doi: 10.30837/rt.2022.1.208.05.
17. Маляренко А.С. Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением и государственного радиолокационного опознавания : справочник. Харьков : ХУПС, 2007. 78 с.
18. Technical Characteristics of the IFF Mk XIIA System Part III: Installed System Characteristics. NATO – STANAG 4193 PT III. 2016.
19. H. Duan, Y. Cheng, B. Shen, K. He, and G. Bai. LFM interference cancellation algorithm based on MDPT-WC for mark XIIA mode 5 // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2020. doi: 10.1109/ICCT50939.2020.9295892.
20. L. Huan, Z. Feng, L. Y. Bai, and W. Jian. One joint demodulation and Despreading algorithm for MOD5 // *The Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 386–397, 2015. doi: 10.2174/1874444301507010386.
21. Li Sheng-qiang. Analysis on Data Format of Mode 5 in Western Mark XIIA // *Journal of the University of Electronic Science and Technology of China*. Vol.40 No.4. 2011.
22. W.-H. Kim, S.-Y. Jung, Y.-S. Lee, and S.-M. Chang. Mark XIIA (Mode 5) IFF system integration and certification test for surface to air missile system // *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 160 – 168, 2022. doi:10.9766/kimst.2022.25.2.160.
23. Обод І.І., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // *Зб. наук. праць Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил*. 2013. № 1(34). С. 123-125.
24. Обод І.І., Шевцова В.В. Відносна пропускна спроможність запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // *Системи обробки інформації*, 2013. № 2(109). С. 74 – 76.
25. H. Li, F. Chen, and J. Wang. A preamble detecting algorithm of MOD-5 interrogating signal // *Applied Mechanics and Materials*, vol. 543-547, pp. 2733–2737, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.543-547.2733.
26. J. Sun. *The 1090 Megahertz Riddle: A Guide to Decoding Mode S and ADS-B Signals*, 2nd ed. TU Delft OPEN Publishing, 2021. doi:10.34641/mg.11.
27. Обод І.І., Свид І.В., Штих І.А. Завадозахищеність запитальних систем спостереження повітряного простору. Харків : ХНУРЕ, 2014. 310 с.
28. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Інформаційна мережа систем спостереження повітряного простору. Харків : ХНУРЕ, 2015. 270 с.
29. Бакуменко Б.В., Обод І.І. Завадозахищеність запитувальних радіотехнічних систем // *Системи озброєння і військова техніка*. 2006. № 2(6). С. 26 – 28.
30. Бакуменко Б.В., Обод І.І. Методи підвищення завадозахищеності запитувальних радіотехнічних систем // *Системи обробки інформації*. 2006. № 9(58). С. 10 – 12.
31. Порівняльний аналіз методів визначення координат повітряних об'єктів системами широкозонавої мультилатерації / І. В. Свид, В. В. Семенець, О. С. Мальцев и др. // *Радіотехніка*. 2022. Вип. 209. С. 162 – 177. doi: 10.30837/rt.2022.2.209.16.

32. Обод И.И., Абрамов А.Д., Крупка А.В. Пространственная избирательность ответчиков как метод повышения помехоустойчивости запросных радиотехнических систем // Моделирование та інформаційні технології : зб. наук. праць НАНУ. 2005. № 33. С. 103 – 107.
33. Обработка информации сетей радиолокационных систем спостереження повітряного простору / І.В. Свид, М.Г. Ткач, А.О. Серіков и др. // Радіотехніка. 2022. Вип. 210. С. 137-145. doi: 10.30837/rt.2022.3.210.11.
34. Обод І.І., Свид І.В., Черних О.П. Оцінка якості передачі інформації у запитальних каналах передачі систем спостереження повітряного простору // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Метрология, стандартизация, сертификация. Харьков, 2011. № 3/11(51). С. 52 – 54.
35. Обод І.І., Свид І.В., Штих І.А. Методи підвищення завадозахищеності літакових відповідачів запитальних систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2015. № 1(126). С. 41 – 43.
36. I. Svyd, I. Obod and O. Maltsev. Interference Immunity Assessment Identification Friend or Foe Systems // Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham, pp. 287-306, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_12.
37. Обод І.І., Свид І.В., Мальцев О.С. Обработка данных радиолокационных систем спостереження повітряного простору: навчальний посібник. Харьков : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
38. I. Svyd, O. Maltsev, I. Obod, and G. Zavolodko. Fusion method of primary surveillance radar data and IFF systems data // 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2020. doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125040.
39. D. He, X. Lu, W. Wang and J. Su. Analysis of Wide Area Multilateration Localization Accuracy Under Different Stations Layout and Aircraft Height // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017, doi: 10.12783/dtetr/iceta2016/7068.
40. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev, G. Zavolodko, and S. Leonov, WAM systems: Comparative Analysis of Information Support Quality // 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020. doi: 10.1109/PICST51311.2020.9468085.

Надійшла до редколегії 10.11.2022

Відомості про авторів:

Свид Ірина Вікторівна – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: iryana.svyd@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4635-6542>

Ткач Марія Геннадіївна – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: maria.zavorotna@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4248-7633>

Обод Іван Іванович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: ivan.obod@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9898-0937>