

**В. О. Єгоров, Ph. D.**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-1738-1375>

**Ю. І. Запорожченко**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0000-0407-163X>

**В. О. Тарасенко**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0005-6267-9455>

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДСИСТЕМИ ПОШУКУ АВТОМАТИЗОВОГО КОМПЛЕКСУ РАДІОРОЗВІДКИ**

*Функціонування системи управління військами й озброєнням ґрунтується на безперервній роботі засобів зв'язку, радіотехнічного забезпечення та різноманітних радіоелектронних комплексів, тому з урахуванням досвіду сучасних бойових дій, можна стверджувати, що радіоелектронна розвідка є найбільш інформативним та ефективним видом воєнної розвідки.*

*Сучасні системи радіорозвідки функціонують в умовах високої щільності передавачів, завадових впливів та апріорної невизначеності параметрів сигналів. Це потребує створення алгоритмічно й апаратно ефективних автоматизованих систем пошуку, здатних забезпечувати виявлення, аналіз та класифікацію широкого спектра радіосигналів у частотно-часовому просторі за обмежених ресурсів.*

*Стрімке зростання складності, інтенсивності та динамічності сучасного радіоефіру зумовлює необхідність удосконалення методів автоматизованого пошуку, розпізнавання та технічного аналізу сигналів. Системи радіорозвідки, що функціонують у військових, спеціальних або цивільних інформаційно-телекомунікаційних середовищах, мають забезпечувати надійну ідентифікацію широкого спектра джерел радіовипромінювання в умовах високої невизначеності та змішаних завадових впливів.*

*Пошук сигналів у ході ведення радіорозвідки має ієрархічний характер, що полягає в досягненні кінцевої мети шляхом послідовного виконання процедур від нижчих рівнів до вищих. Зокрема, це може бути енергетичний пошук сигналів, вимірювання їх параметрів та характеристик, класифікація джерел радіовипромінювання, ідентифікація об'єктів тощо.*

*За таких умов традиційні алгоритми пошуку, що ґрунтуються на статичних процедурах виявлення та фіксованих порогових критеріях, не забезпечують необхідних показників ефективності. Тому актуальною є побудова формалізованої, математично обґрунтованої та системно оптимізованої моделі автоматизованого комплексу пошуку,*

© В. О. Єгоров, Ю. І. Запорожченко, В. О. Тарасенко, 2026

яка враховує багатовимірну природу сигналів, стохастичні характеристики середовища та обмеження апаратно-програмної реалізації.

Об'єктом дослідження є процес пошуку як метод добування розвідувальної інформації, а предметом – підсистема пошуку автоматизованого комплексу радіорозвідки, що реалізується на основі сучасних алгоритмів панорамного огляду спектра, енергетичного виявлення, виділення ознак та інтелектуальних процедур селекції потоків тривоги.

Отримані наукові результати спрямовані на підвищення оперативності та достовірності ведення радіоелектронної розвідки за рахунок автоматизації ключових етапів оброблення радіосигналів, зменшення навантаження на оператора, підвищення ймовірності виявлення сигналів низької інтенсивності та мінімізації хибних тривог у складних умовах радіообстановки.

Застосування запропонованих підходів забезпечує стандартизацію дій, скорочення часу реакції, підвищення точності прийняття рішень та узгодженість роботи різнорівневих елементів системи радіомоніторингу, що в комплексі істотно підвищує ефективність виконання завдань радіоелектронної розвідки.

**Ключові слова:** радіоелектронна розвідка; пошук і пропуск сигналу; хибна тривога; автоматизоване оброблення сигналів; спеціальне програмне забезпечення; матеріали радіоперехоплення; пост радіоперехоплення; автоматизований комплекс пошуку; частотно-часовий простір.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Сучасні умови ведення бойових дій характеризуються різким зростанням значущості інформаційного забезпечення процесів управління військами, зокрема за рахунок використання технічних засобів радіоелектронної розвідки. Інтенсивне застосування різнорідних систем зв'язку, управління та передачі даних формує складну й динамічну радіоелектронну обстановку, у межах якої підрозділи радіоелектронної розвідки змушені працювати з великими обсягами сигналів у режимі жорстких часових обмежень. За таких умов ефективність управлінських рішень безпосередньо залежить від здатності оперативно отримувати, обробляти та узагальнювати дані про радіоелектронну обстановку в реальному часі.

Відомі підходи до автоматизації процесу пошуку та класифікації сигналів не в повній мірі відповідають вимогам сучасної війни, оскільки значна частина операцій виконується вручну або з обмеженим рівнем автоматизації. Це зумовлює залежність результатів від людського фактора, збільшує тривалість оброблення даних та ускладнює своєчасне реагування на зміну радіоелектронної обстановки. Особливі труднощі виникають під час роботи з короткотривалими, адаптивними або малопотужними сигналами, виявлення та аналіз яких потребують значних часових і обчислювальних ресурсів.

Додатковим ускладнювальним фактором є необхідність одночасної роботи з різними типами радіосигналів та забезпечення безперервного контролю значних ділянок частотного діапазону. За відсутності автоматизованих механізмів попереднього оброблення, селекції та систематизації інформації оператори не мають можливості виконувати комплексний аналіз радіоелектронної обстановки та потоку виявлених

сигналів у реальному масштабі часу. Це негативно впливає на повноту та достовірність розвідувальних відомостей, а також на швидкість їх доведення до органів управління.

Отже, у загальному вигляді проблема полягає в невідповідності між зростаючими обсягами радіовипромінювань у контрольованому просторі та обмеженими можливостями їх оперативного оброблення наявними засобами, що обумовлює потребу у створенні автоматизованого методу пошуку, виявлення та класифікації радіосигналів у реальному часі, який забезпечить:

- оброблення великих масивів розвідувальної інформації;
- скорочення часу на виявлення та аналіз сигналів;
- зменшення залежності результатів від суб'єктивних дій оператора;
- підвищення достовірності визначення параметрів сигналів;
- оперативне формування розвідувальних повідомлень.

Розв'язання зазначеної проблеми потребує розроблення та впровадження спеціального програмного забезпечення, яке реалізує автоматизовані алгоритми оброблення сигналів радіоперехоплення та встановить єдиний порядок дій особового складу підрозділів радіоелектронної розвідки на всіх етапах виконання завдань. Запровадження такого підходу створить передумови для підвищення ефективності функціонування системи радіоелектронної розвідки в умовах сучасних бойових дій [5–7, 15].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика автоматизації процесів радіоелектронної розвідки та оброблення сигналів радіоперехоплення є предметом досліджень багатьох вітчизняних і закордонних науковців. У працях українських авторів, зокрема В. І. Ткачука, О. М. Короля, С. О. Гриневича, розглянуто загальні принципи організації радіоелектронної розвідки, особливості функціонування постів радіоперехоплення та роль технічних засобів у системі інформаційного забезпечення управління військами. Дослідники підкреслюють необхідність підвищення оперативності отримання та оброблення розвідувальної інформації, водночас питання комплексної автоматизації цих процесів залишаються розкритими частково. У публікаціях багато уваги приділено фрагментарним питанням побудови підсистем виявлення, спектрального аналізу чи класифікації сигналів, однак комплексні моделі пошукового процесу, а також системні принципи побудови автоматизованих систем пошуку (АСП) лишаються недостатньо формалізованими [21, 22].

У роботах А. І. Павлова, Ю. В. Кириленка, М. О. Пархоменка досліджено методи спектрального та часово-частотного аналізу радіосигналів, а також алгоритми їх виявлення в умовах шумів і завад. Запропоновані підходи формують теоретичну основу первинного оброблення сигналів, однак переважно орієнтовані на лабораторні або спрощені умови застосування та не враховують особливостей багатосигнального середовища і жорстких часових обмежень, характерних для реальних умов бойового застосування [23–26].

Значний внесок у розвиток теорії оброблення сигналів зроблено закордонними науковцями, зокрема S. Naykin, A. Oppenheim, R. Gallager, у своїх працях вони розглядають статистичні, адаптивні та кореляційні методи аналізу сигналів. Ці дослідження заклали фундамент для створення автоматизованих систем виявлення та оцінювання параметрів

сигналів, однак у більшості випадків не враховують специфіки функціонування підрозділів радіоелектронної розвідки в умовах сучасних бойових дій [25–30].

Окрему групу становлять наукові публікації, присвячені застосуванню інтелектуальних методів оброблення радіосигналів, зокрема з використанням алгоритмів машинного навчання та елементів штучного інтелекту. S. Haykin, J. Mitola, Y. Zeng, K. Letaief демонструють можливості автоматичної класифікації та ідентифікації сигналів, проте зазначають обмеження, пов'язані з високими обчислювальними вимогами, необхідністю великих навчальних вибірок та відсутністю стандартизованих методик практичного застосування у військових підрозділах [6, 9, 13, 27–30].

Аналіз сучасних вітчизняних публікацій також свідчить про значущість питань з організації радіоелектронної розвідки, підготовки особового складу та узагальнення бойового досвіду застосування технічних засобів (І. П. Ляшенко, О. В. Сидоренко). Водночас проблема розроблення цілісного автоматизованого методу реєстрації та аналізу сигналів радіоперехоплення, що поєднував би алгоритмічне забезпечення з методикою практичного використання спеціального програмного забезпечення, залишається недостатньо дослідженою [21, 30].

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є обґрунтування та побудова математичної моделі підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіорозвідки, яка дозволяє оптимізувати критерії прийняття рішень та підвищити ймовірність виявлення радіосигналів в умовах апріорної невизначеності та складної радіоелектронної обстановки.

**Виклад основного матеріалу.** Пошук сигналів, як система послідовних дій, передбачає певну невизначеність результату. У разі пошуку сигналів джерел радіовипромінювання (ДРВ) така невизначеність зумовлена низкою факторів: по-перше, невідомим розташуванням сигналу в частотно-часовому просторі (ЧЧП) та в просторі географічних координат; по-друге, наявністю різноманітних завадових впливів, що породжують невизначеність щодо факту наявності сигналу в певній області ЧЧП; по-третє, великою кількістю сторонніх ДРВ, які спричиняють невизначеність щодо належності сигналу до конкретного класу. Отже, результат пошуку має ймовірнісний характер [1, 8–10].

Під час пошуку ДРВ сигнал може бути поданий у загальному вигляді у формі  $m$ -вимірного вектора, складовими якого є: частота  $f_i$ , час  $t_i$ , координати просторового положення ДРВ  $X_i, Y_i, Z_i$ , а також інші технічні характеристики та параметри сигналу  $u_1, u_2, \dots, u_n$ . Тоді кожний ДРВ може бути описаним вектором:

$$S_i = |f_i, t_i, X_i, Y_i, Z_i, u_1, u_2, \dots, u_n|, \quad (1)$$

а вся сукупність ДРВ, сигнали яких впливають на вхід системи пошуку, – певною множиною  $\{S_i\}, i = 1, N$ . Мету пошуку в загальному вигляді можна звести до виявлення в множині  $\{S_i\}$  деякої підмножини  $\{S_j\}, \{S_i\} \in \{S_j\}, j \leq N$ .

За рахунок імовірнісного характеру процесу пошуку ДРВ мають поділ множини  $\{S_i\}$  на підмножини корисних  $\{S_j\}$  та завадових  $\{S_k\}$  ДРВ, який супроводжується помилками

першого та другого роду – хибним розпізнаванням і втратами. За таких умов як узагальнений показник ефективності пошуку доцільно використовувати ймовірність  $P_{\Pi}$  правильного розділення підмножин корисних і завадових ДРВ у разі заданого рівня помилок розділення за допустимий час пошуку  $t_{\Pi}$ :

$$P_{\Pi} = [(\{S_{jkl}\} \cap \{S_k\}) \cup (\{S_{kkl}\} \cap \{S_j\})] \leq \{S_l\}_{\text{доп}} \forall j, k, l \in i, \text{ якщо } t_{\Pi} \leq t_{\text{доп}}, \quad (2)$$

де  $\{S_j\}, \{S_k\}$  – апіорні, а  $\{S_{jkl}\}, \{S_{kkl}\}$  – апостеріорні множини корисних і завадових ДРВ за результатами пошуку;

$\{S_l\}$  – множина помилок розділення.

Аналіз умов ведення пошуку, фізичної природи та особливостей сигналів зумовлює, що будь-який алгоритм пошуку містить обов'язкові процедури:

- енергетичне виявлення сигналів ДРВ у частотно-часовому просторі;
- вимірювання параметрів сигналів для формування їх образу (опису);
- порівняння отриманого образу з еталонними описами класів та ухвалення рішення;
- інформаційну взаємодію із суб'єктом управління.

Кожна з перелічених процедур може бути реалізована різними способами (зокрема комбінованими), проте незмінними залишаються ключова мета пошуку та послідовність операцій. Кожна наступна операція може бути виконана лише після успішного завершення попередньої, а ефективність пошуку загалом визначається якістю виконання всіх етапів, тобто частковими показниками ефективності:

- енергетичного виявлення  $P_{\text{вияв}}$ ;
- оброблення виявлених сигналів ДРВ для виділення ознак  $P_{\text{обсл/вияв}}$ ;
- класифікації сигналів (ДРВ) за отриманими ознаками  $P_{\text{кл/обсл}}$ .

Часткові показники  $P_{\text{вияв}}, P_{\text{обсл/вияв}}, P_{\text{кл/обсл}}$  інтерпретуються як безумовні та умовні ймовірності правильного виконання відповідних операцій: виявлення, оброблення та класифікації сигналів [9, 11, 13].

Отже, узагальнений показник ефективності пошуку може бути виражений через часткові показники процедур пошуку у вигляді певного функціонала:

$$P_{\Pi} = F(P_{\text{вияв}}, P_{\text{обсл/вияв}}, P_{\text{кл/обсл}}, t_{\Pi} \leq t_{\text{доп}}). \quad (3)$$

За умови обов'язкової послідовності процедур пошуку узагальнений показник ефективності може бути поданий у вигляді добутку часткових показників, які залежать здебільшого від структури системи та особливостей алгоритму пошуку:

$$P_{\Pi} = P_{\text{вияв}} P_{\text{обсл/вияв}} P_{\text{кл/обсл}}. \quad (4)$$

Вираз (4) показує, що для підвищення ефективності пошуку необхідно поліпшувати часткові показники ефективності складових операцій пошукового процесу. Очевидно, що для забезпечення необхідного значення узагальненого показника ефективності пошуку кожен із часткових показників повинен задовольняти умову

$$P_{i,j} \geq \sqrt[k]{P_{\Pi \text{ доп}}}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (5)$$

Для здійснення пошуку передусім необхідно сформулювати його конкретну мету. Вихідними даними для його організації є апріорні характеристики ДРВ, відомі оператору.

Вихідні дані задаються у формі обмежень на простір пошуку, які визначають область невизначеності (діапазон частот  $\Phi_0$ , який формалізується як різниця верхньої та нижньої межі сканування  $\Phi_0 = f_{max} - f_{min}$  або виражається через кількість каналів  $\Phi_0 = l * \Delta F_D$ , де  $l$  – кількість частотних каналів, а  $\Delta F_D$  – смуга пропускання одного елементарного каналу; динамічний діапазон рівнів сигналу  $D_p$ , час пошуку  $t_{п}$ , кількість класів  $N_{кл}$ , кількість та природа ознак  $M_{пр}$  тощо), а також вимог щодо точності (роздільна здатність за частотою  $\Delta f$  та часом  $\Delta t$ , точність вимірювання параметрів  $\sigma_i$ ).

Ефективність виявлення сигналу залежить від способу огляду області невизначеності ЧЧП та обраного алгоритму виявлення сигналу на фоні завад. Огляд елементів ЧЧП може виконуватися різними способами:

- паралельним опрацюванням усіх елементів простору;
- послідовним їх переглядом (елемент за елементом) у заданому порядку;
- комбінованим способом, групами елементів чи випадковим зверненням до елементів ЧЧП.

Незалежно від способу огляду повинно бути прийняте рішення про наявність або відсутність сигналу – енергетичне виявлення. Принципово можливим є безпосереднє розв'язання задачі виявлення (вимірювання) певного параметра (або групи параметрів) сигналу в кожному проміжку ЧЧП із подальшою класифікацією, але, оскільки смуга частот і тривалість сигналу, як правило, не збігаються з відповідними параметрами одного елемента ЧЧП, стає неможливим виконання оптимальної фільтрації сигналу та, відповідно, ефективного виявлення й класифікації. Крім того, часові витрати на оброблення в ході вимірювання параметрів сигналу визначаються необхідною точністю вимірювання та є значно більшими, ніж у разі енергетичного виявлення. Це, у свою чергу, різко знижує відносну пропускну здатність системи пошуку.

Вимірювання параметрів сигналу, що використовують як ознаки розпізнавання ДРВ, доцільно виконувати після енергетичного виявлення. Така послідовність операцій суттєво скорочує кількість проміжків ЧЧП, які необхідно обробити для виділення ознак, забезпечує раціональне використання ресурсів системи пошуку та дозволяє здійснювати якісну фільтрацію сигналів. Виділені активні сусідні проміжки ЧЧП групуються в ділянки простору, зайняті сигналами ДРВ. Потім оцінюються їхні параметри (ширина смуги частот, середня частота), після чого формується черга на вимірювання параметрів сигналів.

Вимірювання параметрів кожного сигналу повинно бути виконане за час, що не перевищує його тривалості, незалежно від того, скільки ознак використовується для розпізнавання. В умовах впливу завад точність оцінювання параметра сигналу залежить як від алгоритму оцінювання, так і від тривалості реалізації. Чим довша оброблювана реалізація, тим точніша оцінка. З іншого боку, час оцінювання параметрів визначає пропускну спроможність системи пошуку. Для задоволення суперечливих вимог до точності оцінки сигналів та пропускну спроможності системи пошуку в умовах обмеженої тривалості сигналів найчастіше доводиться обирати компромісне значення часу обслуговування  $t_{обсл}$ .

Для вирішення завдань пошуку як ознаки розпізнавання використовуються спектральні й часові характеристики сигналів та їхні структурні особливості. Їхня специфіка змушує реалізувати окремі вимірювачі для спектральних і часових параметрів із різними алгоритмами оброблення сигналів. З одного боку, це призводить до певної апаратної надмірності, а з іншого – дає змогу скоротити час виділення ознак у разі паралельного оброблення сигналу різними вимірювачами. У складі системи пошуку виділяються автоматизовані робочі місця (АРМ) частотно-фазового та структурно-часового аналізу сигналів. Вибір того чи іншого тракту оброблення сигналу здійснюється напівавтоматично оператором АРМ.

Основними вимогами до параметрів та характеристик сигналів, що використовуються як ознаки розпізнавання, є їхня інформативність з погляду класифікації та можливість подання у формі, зручній для роботи класифікатора.

За отриманим у результаті аналізу формалізованим описом сигналу здійснюється його класифікація, процедура якої зводиться до порівняння отриманого опису сигналу з еталонними описами класів та ухвалення рішення про його належність до одного з класів. При цьому, залежно від поставленої мети, можуть вирішуватися різноманітні завдання:

- розпізнавання видів передач, екземплярів джерел, типів ДРВ;
- розкриття джерел розвідданих тощо.

Вирішальне правило класифікації визначається оператором. У радіорозвідувальних АСП, як правило, реалізується баєсова стратегія оцінювання належності сигналу до певного класу та принцип неостаточних рішень. Право ухвалення остаточного рішення належить оператору, для чого йому надається інформація про ймовірність належності сигналу до того чи іншого класу. Крім того, оператору зазвичай надходять результати технічного аналізу сигналів у вигляді числових або графічних характеристик. Ці дані використовуються для ухвалення рішення та для навчання системи.

Основними елементами АСП є (рис. 1):

- енергетичний виявлювач (ЕВ);
- підсистема оброблення сигналів, технічного аналізу та виділення ознак (ПОС);
- підсистема оброблення інформації (ПОІ);
- підсистема відображення результатів (ПВР);
- підсистема контролю та управління технічними засобами (ПКУ).

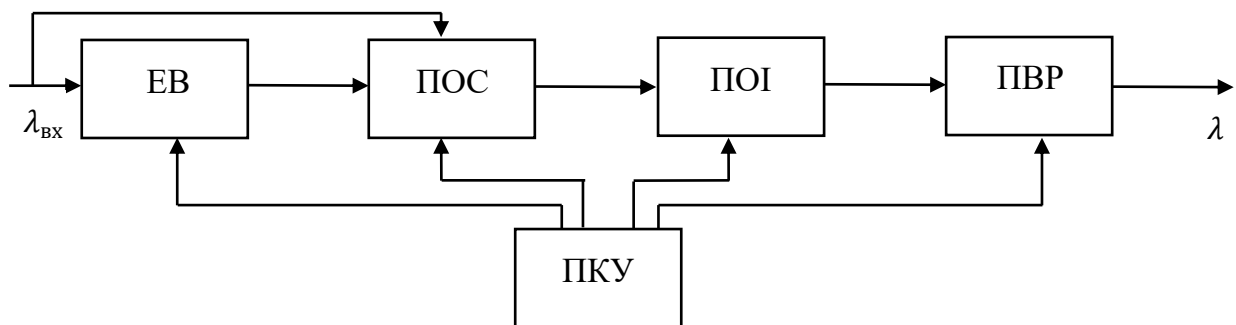


Рис. 1. Структурна схема АСП сигналів [31]

ПОС і ПОІ входять до комплексу розпізнавання.

ЕВ виконує завдання розв'язання невизначеності щодо наявності сигналів у ЧЧП. Його функції полягають у огляді частин ЧЧП, що складають область невизначеності, встановленні факту наявності або відсутності сигналів у контрольованій області простору пошуку, формуванні сигналів цілевказання для підсистеми виділення ознак або оператора. У низці випадків енергетичне виявлення може вирішувати завдання виявлення з класифікацією за найпростішими ознаками сигналу, наприклад, за його типом (неперервний аналоговий чи дискретний), ознакою новизни, тривалістю, шириною спектра.

Структура виявлювача визначається наявними апріорними даними про параметри сигналу. Слід зазначити, що статистичні критерії виявлення відомого та невідомого сигналу ідентичні. Відмінність полягає лише в тому, що в першому випадку вирішальне правило ґрунтується на основі багатовимірних умовних щільностей розподілу всіх відомих параметрів, а в другому – використовується одновимірна умовна щільність розподілу амплітуд.

У ході пошуку вирішується завдання виявлення повністю невідомого сигналу. Припускається лише, що він зосереджений в обмеженій смузі частот  $\Delta F_c$  і є вузькосмуговим, тобто виконується умова  $f_c \gg \Delta F_c$ . Завдання синтезу оптимального виявлювача зводиться до мінімізації ймовірностей хибних рішень першого та другого роду: хибних тривог  $P_{хт}$  та пропусків сигналу  $P_{пс}$ , тобто

$$P_{пр} = P_{хт} + P_{пс} = \min \left[ p \int_{u_0}^{\infty} \omega(u/0) du + q \int_0^{u_0} \omega(u/1) du \right], \quad (6)$$

де  $\omega(u/0)$ ,  $\omega(u/1)$  – щільності розподілу амплітуд шуму та суміші сигнал/шум відповідно;

$p$  і  $q$  – апріорні ймовірності наявності та відсутності сигналу на проміжку ЧЧП;

$u_0$  – пороговий рівень прийняття рішення.

Критерії прийняття рішення полягають у порівнянні відношення правдоподібності з деяким порогом  $R_{п}$ , перевищення якого означає факт виявлення сигналу:

$$\omega(u/1)/\omega(u/0) > R_{п}. \quad (7)$$

Для критерію максимальної правдоподібності, ідеального спостерігача та середнього ризику поріг прийняття рішення повинен дорівнювати 1,  $q/p$ ,  $q\P_1/q\P_2$  відповідно. Тут

$\Pi_1$  – вартість втрат, зумовлена хибними тривогами, а  $\Pi_2$  – пропуском сигналу. Для критерію Неймана – Пірсона поріг прийняття рішення вибираємо з умови забезпечення рівня хибних тривог, що не перевищує допустимого значення:

$$P_{хт} \leq P_{хт \text{ доп}}, \quad R = f(P_{хт \text{ доп}}). \quad (8)$$

Оскільки в практичних завданнях пошуку недопустиме перевантаження класифікатора хибними тривогами, то реальні схеми ЕВ реалізують, як правило, критерій Неймана – Пірсона.

У разі використання будь-якого зі згаданих критеріїв імовірність хибних рішень суттєво залежить від відношення сигнал / шум: чим воно більше, тим менша ймовірність прийняття хибних рішень за фіксованого порога. Тому в практичних схемах виявлювачів вибір порога здійснюється з урахуванням відношення сигнал / шум.

ЕВ наявних АСП реалізовано на базі типових панорамних радіоприймальних пристроїв (РПрП), доповнених одним або кількома спеціальними трактами виявлення та пристроєм логічного оброблення помилок. Тракт виявлення містить вузькосмуговий фільтр, детектор, інтегратор, пороговий пристрій і реалізує таке правило:

$$U(t) = \int_{t-T}^t s^2(\tau) d\tau \geq U_0, \quad (9)$$

де  $s(t)$  – обвідна вихідної напруги вузькосмугового фільтра.

Смуга пропускання тракту визначається вимогами до роздільної здатності та швидкості перелаштування панорамного РПрП.

Панорамні РПрП, доповнені такими виявлювачами, реалізують послідовні й паралельно-послідовні процедури огляду ЧЧП. Автоматичне керування перелаштуванням РПрП може здійснюватися різними способами залежно від його конструктивних особливостей та типу ЕВ. Характерні два способи керування: автономний та за командами зовнішнього пристрою керування або ПЕОМ. Перший застосовується в АСП, спроектованих на базі РПрП зі звичайним частотно-модульованим гетеродином, спеціалізованих пристроях оброблення та програмних автоматах. Другий – за використання цифрових обчислювальних машин (ЦОМ) та РПрП із керованими синтезаторами гетеродинних напруг. Спосіб керування визначає і характер інформаційного обміну між виявлювачем та ПОС. У разі апаратної реалізації виявлювача та пристрою оброблення останній видає сигнал дозволу на перелаштування та приймає інформацію про значення частоти налаштування й ознаку помилки або її відсутності на виході виявлювача.

На сьогодні широко застосовують паралельно-послідовні виявлювачі на основі цифрового оброблення сигналів із виходу тракту проміжної частоти панорамного РПрП або широкосмугового низькочастотного виходу. Такий виявлювач ґрунтується на принципі цифрового аналізу спектра групового сигналу в смузі  $\Delta\Phi$ , фундаментальних теоремах Котельникова, Фур'є та рівності Парсеваля. Уся смуга частот пошуку  $\Phi_0$  розбивається на  $n = \Phi_0/\Delta\Phi$  ділянок, для кожної з яких виконується алгоритм цифрового спектрального аналізу та виявлення. Ширина смуги  $\Delta\Phi$  одночасного аналізу визначається можливостями аналого-цифрового перетворення (АЦП), зокрема його швидкодією та розрядністю, а також можливостями ПЕОМ. При цьому операції алгоритмів дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) або їхніх модифікацій, наприклад, швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), можуть реалізовуватися на спеціальних процесорах або безпосередньо на ПЕОМ [9, 13, 14].

Для повного усунення спотворень у всій смузі аналізованих частот має виконуватися така умова:

$$\tau_{\text{ап}} \leq \frac{1}{2\pi f_B 2^{N-1}}, \quad (10)$$

де  $\tau_{\text{ап}}$  – апертурний час (інтервал часу, протягом якого знімається «миттєве» значення амплітуди сигналу);

$N$  – розрядність АЦП.

У разі дискретизації сигналів на проміжній частоті вимоги до апертурного часу посилюються, оскільки верхня гранична частота становить

$$f_{\text{в}} = f_{\text{пч}} + \frac{\Delta\Phi}{2}. \quad (11)$$

При цьому частота дискретизації  $f_{\text{д}}$  не повинна бути кратною одній з аналізованих частот для усунення явища мімікрії (накладання частот у спектрі).

Вибір мінімально можливої частоти дискретизації  $f_{\text{д}}$  здійснюється з такої умови:

$$f_{\text{д min}} = \frac{2f_{\text{пч}} + \Delta\Phi}{m}, \quad (12)$$

де  $m = \text{ent}[(f_{\text{пч}} + \Delta\Phi/2)/\Delta\Phi]$ .

Слід зазначити, що за непарного  $m$  перетворений у цифрову форму сигнал має спектр, який повністю відповідає спектру безперервного аналога, а в разі парного  $m$  – інвертований відносно аналогового сигналу.

Результатом цифрового спектрального аналізу, в основу якого покладено алгоритми ДПФ, є не миттєвий спектр, як в аналогових аналізаторах, а комплексний дискретний спектр реалізації, отриманий за кінцевою кількістю відліків  $M$ :

$$a_k = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} h(i)S(i\Delta t) \cos \frac{2\pi ik}{M}; \quad (13)$$

$$b_k = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} h(i)S(i\Delta t) \sin \frac{2\pi ik}{M}, \quad (14)$$

де  $a_k$  і  $b_k$  – дійсна та уявна частини комплексних коефіцієнтів спектра Фур'є;

$h(i)$  – вагова (віконна) функція;

$k$  – номер гармонічної складової спектра реалізації, що аналізується.

За коефіцієнтами  $a_k$  і  $b_k$  обчислюємо коефіцієнти спектрів амплітуд  $C_k$  та фаз  $\varphi_k$  реалізації, що аналізується:

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \varphi_k = -\text{arctg} \frac{a_k}{b_k}. \quad (15)$$

Інтервал частот між двома сусідніми складовими спектра залежить лише від тривалості реалізації та має величину

$$\Delta F = \frac{1}{T} = \frac{f_{\text{д}}}{M} = \frac{f_{\text{д}} \Delta t_{\text{д}}}{T_p}, \quad (16)$$

де  $\Delta t_{\text{д}}$  – інтервал дискретизації;

$T_p$  – тривалість реалізації.

У смузі аналізу міститиметься

$$\Delta\Phi/\Delta F = M/2 \quad (17)$$

складових спектра амплітуд.

Оскільки спектр амплітуд одиначної реалізації обмеженої тривалості є неконсистентною оцінкою спектра випадкового процесу, то для підвищення якості спектрального аналізу здійснюємо усереднення за реалізаціями тривалості  $T_p$  або усереднення за частотою на тривалості реалізації  $T_p' = N_1 T_p$ . За оцінки обираються, відповідно, середні значення коефіцієнтів спектрів амплітуд

$$\bar{C}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{k+N_1} C_i \quad (18)$$

або середні значення коефіцієнтів  $\bar{C}_k$  для  $N$  наступних поспіль коефіцієнтів спектра амплітуд

$$\bar{C}_k = \sum_{i=k}^{k+N_1} C_i. \quad (19)$$

Обидва розглянуті методи рівноцінні з погляду зору мінімізації дисперсії оцінки, проте усереднення за часом вимагає менших ресурсів ПЕОМ. Слід зазначити, що усереднення спектральних складових реалізацій дозволяє зменшити окрему середньоквадратичну похибку вимірювання в  $N_1$  разів.

Для розв'язання задач панорамного виявлення сигналів потрібно оцінювати не спектр амплітуд реалізації, а спектральну густину енергії або потужність сигналу. У цьому разі використовуємо квадрати середніх значень коефіцієнтів розкладу Фур'є  $C_k^2$ , для отримання яких потрібні додаткові ресурси ПЕОМ. Середню потужність дискретизованого сигналу, що оцінюється відповідно до теореми Парсеваля, визначаємо як

$$\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} |S(i\Delta t)|^2 = \sum_{k=0}^{M-1} |C(k)|^2. \quad (20)$$

Вона дорівнює сумі потужностей окремих спектральних складових та не залежить від їхніх фаз. Для скорочення часових витрат на цифрове оброблення сигналів у наш час широко застосовують алгоритми ШПФ.

Оптимізація пристрою виявлення зводиться до вибору таких часткових показників розрізнення сигналу та завади, за яких для заданого значення  $P_{\text{вияв}}(P_{\text{хт}})$  відношення сигнал / шум є мінімальним, або, за відомого  $U_c/U_{\text{ш}}$ , – до вибору порога виявлення  $U_0$ , що забезпечує необхідні значення  $P_{\text{вияв}}(P_{\text{хт}})$ . У разі панорамної побудови виявлювача звернення до частини частотно-часового простору – елементарного каналу зі смугою  $\Delta F_d$  – відбувається періодично з періодом  $T_i$ , а спостереження здійснюється протягом часу

$$\tau_a = T_i/l = T_0 \frac{\Delta F_d}{\Delta\Phi}, \quad (21)$$

де  $l$  – кількість каналів.

Отже, для виявлення сигналу необхідне виконання двох умов: збіг налаштування виявлювача з частотою сигналу, коли він наявний на часовому інтервалі  $\Delta\tau$ , необхідному

для прийняття рішення, та вирізнення сигналу на фоні шуму. Оскільки обидві події мають імовірнісний характер, то ймовірність одиничного виявлення сигналу має такий вигляд:

$$P_{\text{вияв}} = P_{\text{зб}/\Delta\tau} P_{\text{вияв}}(U_0), \quad (22)$$

де  $P_{\text{зб}/\Delta\tau}$  – імовірність збігу частоти сигналу з частотою налаштування виявлювача;

$P_{\text{вияв}}(U_0)$  – імовірність виявлення сигналу в шумах, яка залежить від порогового рівня  $U_0$ . У разі експоненційного розподілу тривалостей сигналів імовірність збігу має такий вигляд:

$$\bar{P}_{\text{зб}/\Delta\tau} = \alpha e^{-\beta} (1 - e^{-\frac{1}{\alpha}}), \quad (23)$$

де  $\alpha = \frac{\bar{t}_c}{T_0}$  – безрозмірний параметр, що характеризує відносну тривалість сигналу порівняно з періодом огляду всього частотного діапазону;

$\beta = \frac{\tau_a}{\bar{t}_c}$  – параметр, який визначає відносний час спостереження в одному частотному каналі до середньої тривалості самого сигналу;

$\tau_a$  – час перегляду частотного каналу;

$\bar{t}_c$  – середня тривалість сигналу;

$T_0$  – період огляду.

Імовірність  $P_{\text{вияв}}(U_0)$  можна знайти як відносний час перебування обвідної  $s(t)$  вище деякого порогового рівня  $U_0$ . Для каналів, що періодично стробуються, імовірність виявлення сигналу обчислюємо як відносну частоту викидів  $s(t)$  за пороговий рівень:

$$P_{\text{вияв}} = \frac{k_B}{\mu_{\text{СК}}}, \quad (24)$$

де  $k_B$  – кількість викидів за пороговий рівень за час пошуку  $T_H$ ;

$\mu_{\text{СК}}$  – кількість сканувань, що дорівнює

$$\mu_{\text{СК}} = \frac{T_H}{T_0} = T_H F_{\text{СК}}. \quad (25)$$

Середню кількість хибних викидів за  $U_c = 0$  для каналу зі стробуванням за час пошуку розраховуємо в такий спосіб:

$$k_B = P_{\text{хт}}(U_0) \mu_{\text{СК}}. \quad (26)$$

Тоді загальна кількість хибних викидів за одиницю часу у всій смузі огляду становить

$$N_\Phi = P_{\text{хт}}(U_0) \mu_{\text{СК}} l. \quad (27)$$

Імовірність хибних тривог у каналі, виражена через характеристики виявлювача та допустимий рівень хибних тривог, має такий вигляд:

$$P_{\text{хт}} = \frac{N_\Phi}{\mu_{\text{СК}} l} = \frac{N_\Phi T_0}{T_H l} = \frac{N_\Phi \Delta F_{\text{д}}}{T_H F_{\text{СК}} \Phi_0} \quad (28)$$

для порогового рівня

$$U_0 = \sqrt{2 \ln \left( \frac{T_H F_{CK} \Phi_0}{N_{\phi} \Delta F_d} \right) \sigma_{\text{ш}}^2}. \quad (29)$$

Аналіз виразів (28)–(30) та практичний досвід показують неефективність виявлення за одиничним перевищенням порогового рівня та необхідність використання критеріїв, які краще враховують часову структуру сигналу. До них належить критерій  $k$  із  $n$ ,  $k < n$ , який полягає в тому, що приймається рішення про наявність сигналу, якщо за фіксовану кількість періодів сканування  $n$  мало місце не менше  $k$  перевищень порогового рівня в частотному каналі. У разі використанні такого критерію ймовірність виявлення  $P_{\text{вияв}(k,n)}$  та хибної тривоги  $P_{\text{хт}(k,n)}$  оцінюються за такими виразами:

$$P_{\text{вияв}(k,n)} = \sum_{i=k}^n C_n^i P_{\text{вияв}}^i(U_0) [1 - P_{\text{вияв}}(U_0)]^{n-i}; \quad (30)$$

$$P_{\text{хт}(k,n)} = \sum_{i=k}^n C_n^i P_{\text{хт}}^i(U_0) [1 - P_{\text{хт}}(U_0)]^{n-i}. \quad (31)$$

Перевага логіки « $k$  із  $n$ » пояснюється такими факторами: у разі того ж ступеня достовірності виявлення сигналу зменшується необхідне значення ймовірності одиничного виявлення, і за ті ж ймовірності хибної тривоги збільшується допустиме значення ймовірності одиничного хибного викиду, що еквівалентно зниженню порога  $U_0$ . Обидва ці фактори зумовлюють зменшення відношення сигнал/шум, необхідне для отримання заданої ймовірності виявлення сигналу [5, 15–18].

Узагальнюючи викладене вище, комплексну математичну модель підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіоелектронної розвідки можна подати як ієрархічну систему взаємопов'язаних аналітичних співвідношень. Вхідним впливом моделі є багатовимірний потік сигналів джерел радіовипромінювання, що описується просторово-часовими та технічними параметрами у вигляді векторів  $S_i$  (1). Процес панорамного огляду та енергетичного виявлення в моделі формалізується через алгоритми цифрового спектрального аналізу (13)–(20) із подальшим застосуванням імовірнісних критеріїв прийняття рішень, зокрема логіки « $k$  із  $n$ » (30)–(31), що дозволяє мінімізувати ймовірність хибних тривог  $P_{\text{хт}}$ . Цільовою функцією запропонованої математичної моделі є узагальнений показник ефективності пошуку  $P_{\text{п}}$  (4), який інтегрує часткові ймовірності енергетичного виявлення, виділення ознак та класифікації в умовах заданих обмежень на час аналізу  $t_{\text{п}}$  та смугу огляду  $\Phi_0$ . Таке системне узагальнення дозволяє аналітично пов'язати апаратні характеристики комплексу з імовірнісними показниками якості добування розвідувальної інформації.

**Висновки.** Обґрунтовано доцільність автоматизації процесів пошуку сигналів ДРВ в умовах зростання обсягів розвідувальної інформації та обмеженого часу на її оброблення в підрозділах радіоелектронної розвідки.

Розроблена математична модель основних етапів оброблення сигналів теоретично підтверджує можливість підвищення достовірності й оперативності результатів за рахунок автоматизації та зменшення впливу людського фактора, а також створює аналітичне підґрунтя для проведення подальшого імітаційного моделювання системи.

Обґрунтовано математичну модель підсистеми пошуку автоматизованого комплексу радіоелектронної розвідки, яка враховує ієрархічну організацію процесу пошуку, імовірнісний характер виявлення сигналів та вплив завад у складній радіоелектронній обстановці.

Запропоновано узагальнений показник ефективності пошуку, що поєднує часткові показники енергетичного виявлення та оброблення сигналів і дозволяє оптимізувати алгоритми автоматизованого оброблення з урахуванням часових та обчислювальних обмежень.

Отримані результати створюють методичну основу для підвищення оперативності й достовірності радіоелектронної розвідки, зменшення навантаження на оператора та практичної реалізації автоматизованих комплексів пошуку сигналів у сучасних умовах ведення бойових дій [1, 5, 8, 15].

### СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Бортник Г. Г., Негур А. А. Цифрова обробка радіосигналів у пристроях приймання. Вінниця : ВНТУ, 2020. 212 с.
2. Бортник Г. Г., Кирилюк С. О. Первинна обробка радіосигналів у цифрових приймачах. Вінниця : ВНТУ, 2019. 198 с.
3. Романов О. М., Ніколаєв С. М., Орлюк Є. І. Модель комплексу радіомоніторингу як багатофазної системи масового обслуговування // Радіоелектроніка та системи зв'язку. 2022. Т. 65, № 3. С. 155–164. <https://doi.org/10.3103/S0735272722030050>
4. Гребенюк О. П., Роговець М. А. Застосування просторової обробки в системах радіомоніторингу // Проблеми створення складних інформаційних систем. 2021. № 2. С. 96–104.
5. Козловський В. А., Ковальчук О. В. Автоматизація процесів радіомоніторингу в сучасних системах розвідки // Системи управління, навігації та зв'язку. 2020. № 4. С. 87–94.
6. Ляшенко В. О., Савченко О. М. Методи виявлення сигналів у складній радіоелектронній обстановці // Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2019. № 6. С. 56–63.
7. Шевченко І. В., Пархоменко А. П. Інформаційні технології в системах радіоелектронної розвідки // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2021. № 2. С. 34–41.
8. Stoica P., Moses R. L. Spectral Analysis of Signals. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2005. 452 p.
9. Kay S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. II: Detection Theory. Prentice Hall, 1998. 684 p.
10. Proakis J. G., Manolakis D. K. Digital Signal Processing. Pearson Education, 2007. 1104 p.
11. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. McGraw-Hill, 2005. 517 p.
12. Skolnik M. I. Radar Handbook. McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
13. Poor H. V. An Introduction to Signal Detection and Estimation. Springer, 1994. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2341-0>
14. Greco M. S., Gini F., Rangaswamy M. Statistical Analysis of Radar Clutter Data // IEEE TAES. 2012. Vol. 48, No. 3. P. 2342–2361.
15. Pham Q.-V. et al. Intelligent Radio Signal Processing: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 15625–15644.

16. Tandiya N., et al. Deep Predictive Coding Neural Network for RF Anomaly Detection in Wireless Networks // IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403654>
17. Eldar Y. C., Kutyniok G. Compressed Sensing: Theory and Applications. Cambridge Univ. Press, 2012. 544 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794308>
18. Pemasiri A. et al. Automatic Radar Signal Detection and FFT Estimation Using Deep Learning. arXiv:2402.19073, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICSPCS63175.2024.10815794>
19. Simon M. K., Divsalar D. Foundations of Digital Communication. Wiley, 2005. 240 p.
20. Haykin S. Cognitive Dynamic Systems. Cambridge Univ. Press, 2012. 310 p.
21. Application of Software for Comprehensive Intelligence Collection in the Interests of Enemy Fire Engagement / S. S. Hatsenko, O. H. Metalidi, S. O. Bohatyrov, I. I. Vasyliayko // Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine. 2024. No. 1 (80). P. 87–93. URL: <https://znp-cvsvd.nuou.org.ua/article/view/305724> (last accessed: 10.03.2026).
22. Ivanov O. V., Kuznietsov D. O., Hryhorak S. V. Indicators for Assessing the Informational Accessibility of Radio Emission Sources in Electronic Intelligence // Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine. 2020. URL: <https://znp-cvsvd.nuou.org.ua/article/view/202212> (last accessed: 15.03.2026).
23. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Pearson, 2010. 1108 p.
24. Gallager R. G. Principles of Digital Communication. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 422 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813498>
25. Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2005. Vol. 23, Iss. 2. P. 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
26. Mitola J. Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio : doctoral dissertation. Stockholm : Royal Institute of Technology, 2000. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8730> (last accessed: 01.03.2026).
27. Letaief K. B., Zhang W. Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks // Proceedings of the IEEE. 2009. Vol. 97, Iss. 5. P. 878–893. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>
28. Yücek T., Arslan H. A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2009. Vol. 11, No. 1. P. 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>
29. O’Shea T. J., Roy T., Clancy T. C. Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2018. Vol. 12, No. 1. P. 168–179. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2797022>
30. The Ukrainian Military: Modernity and Historical Retrospective : Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Kyiv, November 27, 2025. Kyiv : National Defence University of Ukraine, 2025. 356 p. URL: <https://nuou.org.ua/assets/documents/tezy-6-mnpk-2025.pdf> (last accessed: 10.03.2026).

31. Радіоелектронна розвідка: пошук та спостереження : навч. посіб. Київ : НУО України, 2017. 200 с.

*Стаття надійшла до редакції 20.03.2026.*

*Прийнято до друку 20.04.2026.*

*Дата публікації 30.06.2026.*

## REFERENCES

1. Bortnyk, H. H., & Nehur, A. A. (2020). *Tsyfrova obrobka radiosyhnaliv u prystroiakh pryimannia [Digital Radio Signal Processing in Receiving Devices]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
2. Bortnyk, H. H., & Kyryliuk, S. O. (2019). *Pervynna obrobka radiosyhnaliv u tsyfrovyykh pryimachakh [Primary processing of radio signals in digital receivers]*. Vinnytsia [in Ukrainian].
3. Romanov, O. M., Nikolaiev, S. M., & Orliuk, Ye. I. (2022). Model kompleksu radiomonitorynhu yak bahatofaznoi systemy masovoho obsluhovuvannia [Radio Monitoring Complex Model as Multi-Phase Queuing System]. *Visti VNZ. Radioelektronika [Radioelectronics and Communications Systems]*, 65, 3, 145–152. <https://doi.org/10.3103/S0735272722030050> [in Ukrainian].
4. Hrebeniuk, O. P., & Rohovets, M. A. (2021). Zastosuvannia prostorovoi obrobky v systemakh radiomonitorynhu [Application of spatial processing in radio monitoring systems]. *Problemy stvorennia skladnykh informatsiinykh system [Problems of Creation of Complex Information Systems]*, 2, 96–104 [in Ukrainian].
5. Kozlovskiy, V. A., & Kovalchuk, O. V. (2020). Avtomatyzatsiia protsesiv radiomonitorynhu v suchasnykh systemakh rozvidky [Automation of Radio Monitoring Processes in Modern Intelligence Systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku [Systems of Control, Navigation and Communication]*, 4, 87–94 [in Ukrainian].
6. Liashenko, V. O., & Savchenko, O. M. (2019). Metody vyavlennia syhnaliv u skladnii radioelektronni obstanovtsi [Methods of signal detection in a complex radio-electronic environment]. *Naukovi visti NTUU «KPI» [KPI Science News]*, 6, 56–63 [in Ukrainian].
7. Shevchenko, I. V., & Parkhomenko, A. P. (2021). Informatsiini tekhnologii v systemakh radioelektronnoi rozvidky [Information Technologies in Electronic Intelligence Systems]. *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia [Information Technology and Computer Engineering]*, 2, 34–41 [in Ukrainian].
8. Stoica, P., Moses, R. L. (2005). *Spectral Analysis of Signals*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
9. Kay, S. M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. II: Detection Theory*. Prentice Hall.
10. Proakis, J. G., & Manolakis, D. K. (2007). *Digital Signal Processing*. Pearson Education.
11. Richards, M. A. (2005). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill.
12. Skolnik, M. I. (2008). *Radar Handbook*. McGraw-Hill.
13. Poor, H. V. (1994). *An Introduction to Signal Detection and Estimation*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2341-0>

14. Greco, M. S., Gini, F., & Rangaswamy, M. (2012). Statistical Analysis of Radar Clutter Data. *IEEE TAES*, 48, 3, 2342–2361.
15. Pham, Q.-V., et al. (2020). Intelligent Radio Signal Processing: A Survey. *IEEE Access*, 8, 15625–15644.
16. Tandiya, N., et al. (2018). Deep Predictive Coding Neural Network for RF Anomaly Detection in Wireless Networks. In *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2018.8403654>
17. Eldar, Y. C., & Kutyniok, G. (2012). *Compressed Sensing: Theory and Applications*. Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511794308>
18. Pemasiri, A., et al. (2024). Automatic Radar Signal Detection and FFT Estimation Using Deep Learning. In *17th International Conference on Signal Processing and Communication System (ICSPCS)* <https://doi.org/10.1109/ICSPCS63175.2024.10815794>
19. Simon, M. K., & Divsalar, D. (2005). *Foundations of Digital Communication*. Wiley.
20. Haykin, S. (2012). *Cognitive Dynamic Systems*. Cambridge Univ. Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511818363>
21. Hatsenko, S. S., Metalidi, O. H., Bohatyrov, S. O., & Vasyliayko, I. I. (2024). Application of Software for Comprehensive Intelligence Collection in the Interests of Enemy Fire Engagement. *Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*, 1 (80), 87–93. URL: <https://znp-cvsd.nuou.org.ua/article/view/305724> (last accessed: 10.03.2026).
22. Ivanov, O. V., Kuznietsov, D. O., & Hryhorak, S. V. (2020). Indicators for Assessing the Informational Accessibility of Radio Emission Sources in Electronic Intelligence. *Collection of Scientific Papers of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defence University of Ukraine*. URL: <https://znp-cvsd.nuou.org.ua/article/view/202212> (last accessed: 15.03.2026).
23. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing*. 3<sup>rd</sup> ed. Pearson.
24. Gallager, R. G. (2008). *Principles of Digital Communication*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511813498>
25. Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 2, 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380> .
26. Mitola, J. (2000). *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*: doctoral dissertation. Stockholm: Royal Institute of Technology. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A8730> (last accessed: 01.03.2026).
27. Letaief, K. B., & Zhang, W. (2009). Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the IEEE*, 97, 5, 878–893. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015716>
28. Yücek, T., & Arslan, H. (2009). A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 11, 1, 116–130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>

29. O'Shea, T. J., Roy, T., & Clancy, T. C. (2018). Over-the-Air Deep Learning Based Radio Signal Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 12, 1, 168–179. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2018.2797022>
30. *The Ukrainian Military: Modernity and Historical Retrospective: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference*. Kyiv, November 27, 2025. Kyiv: National Defence University of Ukraine. URL: <https://nuou.org.ua/assets/documents/tezy-6-mnpk-2025.pdf> (last accessed: 10.03.2026).
31. *Radioelektronna rozvidka: poshuk ta sposterezhenia: navch. posib.* [Electronic Intelligence: Search and Surveillance: textbook]. (2017). Kyiv [in Ukrainian].

**V. O. Yehorov, Y. I. Zaporozhchenko, V. O. Tarasenko**

### **MATHEMATICAL MODEL OF THE SEARCH SUBSYSTEM OF THE AUTOMATED RADIO INTELLIGENCE COMPLEX**

*The functioning of command and control systems for troops and weapons is based on the continuous operation of communication means, radio engineering support, and various radio-electronic complexes. Therefore, considering the experience of modern combat operations, electronic intelligence (ELINT) represents one of the most informative and effective types of military intelligence.*

*Modern radio intelligence systems operate under conditions of high transmitter density, intensive interference, and a priori uncertainty of signal parameters. This necessitates the development of algorithmically and hardware-efficient automated search systems (ASS) capable of detecting, analyzing, and classifying a wide range of radio signals in the time–frequency domain under limited resource constraints.*

*The rapid growth in complexity, intensity, and dynamics of the modern radio environment determines the need to improve methods of automated signal search, recognition, and technical analysis. Radio intelligence systems operating in military, special-purpose, or civilian information and telecommunication environments must ensure reliable identification of a wide range of radio emission sources (RES) under conditions of high uncertainty and mixed interference effects.*

*Signal search in radio intelligence has a hierarchical nature, which consists in achieving the final objective through the sequential execution of procedures from lower to higher levels. In particular, this includes energy-based signal detection, measurement of signal parameters and characteristics, classification of radio emission sources, and object identification.*

*Under such conditions, traditional search algorithms based on static detection procedures and fixed threshold criteria fail to provide the required performance indicators. Therefore, the development of a formalized, mathematically justified, and system-optimized model of an automated search complex is a relevant task. Such a model must take into account the multidimensional nature of signals, the stochastic characteristics of the environment, and the constraints of hardware-software implementation.*

*The object of the study is the signal search process as a method of intelligence acquisition. The subject of the study is the search subsystem of an automated radio intelligence complex*

*implemented on the basis of modern algorithms for panoramic spectrum monitoring, energy detection, feature extraction, and intelligent procedures for alarm stream selection.*

*The obtained scientific results are aimed at increasing the timeliness and reliability of electronic intelligence operations by automating key stages of radio signal processing, reducing operator workload, increasing the probability of detecting low-intensity signals, and minimizing false alarms under complex radio-environment conditions.*

*The application of the proposed approaches ensures the standardization of operational actions, reduction of response time, improvement of decision-making accuracy, and coordination of multi-level elements of the radio monitoring system, which together significantly enhances the effectiveness of electronic intelligence task execution.*

**Keywords:** *electronic intelligence; signal search; false alarm; missed detection; automated signal processing; specialized software; radio interception materials; radio interception post; automated search complex; time–frequency domain.*