

3.2 Методи інтелектуального управління засобами завадозахисту систем радіозв'язку спеціального призначення

Метод синтезу раціональної топології систем радіозв'язку спеціального призначення

Завдання управління топологією систем радіозв'язку (СРЗ) полягає в забезпеченні передачі максимальної кількості повідомлень з необхідною якістю (достовірністю, оперативністю, надійністю та ін.).

Топологія визначає потенційні можливості СРЗ з доставки даних між вузлами, що взаємодіють [128-132]. Мобільність (відмови, знищення пакетів) вузлів призводить до різних мережевих конфігурацій топології. В таких умовах зміна топології мережі може мати більший ефект, на відміну від використання маршрутизації.

Метод синтезу раціональної топології СРЗ, розроблені до теперішнього часу, в основному використовують як вихідні дані обмежену кількість можливих варіантів радіоелектронної обстановки, які визначаються, як правило, на основі суб'єктивних оцінок осіб, що приймають рішення. Дослідження всього простору рішень при визначенні раціональної топології, як правило, ускладнене із-за занадто великого обсягу необхідних розрахунків і неможливості аналітичного описання цільової функції.

Генетичний алгоритм, використання якого запропоноване в дослідженні, дозволяє знайти раціональну топологію СРЗ з урахуванням варіанту ведення радіоелектронного придушення противника.

Розглянемо задачу управління топологією СРЗ як задачу інтелектуального управління [128-135].

Нехай середовище описується парою $X(t) = \{\Lambda(t), E(t)\}$, де $\Lambda(t)$ – контрольований стан СРЗ (потоки даних, пріоритетність абонентів, їх місце

підключення до СРЗ та ін.); $E(t)$ – її неконтрольований стан (перешкода, стан противника).

Аналогічно пара $B(t) = \{Y(t), H(t)\}$, що описує стан СРЗ: $Y(t)$ – її контрольований стан (середній час затримки пакетів в гілках мережі зв'язку, зв'язність СРЗ, ступінь навантаження вузлів комутації та ін.); $H(t)$ – неконтрольований стан (інтенсивність обслуговування пакетів в каналах та вузлах комутації та ін.).

В якості основного критерію ефективності СРЗ спеціального призначення візьмемо максимум її пропускної здатності $\max C$. Він визначений на контролюємих станах системи та середовища:

$$C(t) = C(\Lambda(t), Y(t)). \quad (1)$$

Стан СРЗ $Y(t)$ в свою чергу залежить від згаданих $\Lambda(t)$, $E(t)$, $H(t)$, а також від управління $U(t)$:

$$Y(t) = F(\Lambda(t), E(t), H(t), U(t)), \quad (2)$$

де F – оператор системи, $U(t)$ – вибір вирішального методу управління радіоресурсом, топологією, маршрутизацією, навантаженням, безпекою, та якістю обслуговуванням СРЗ $\bar{Y}(t) = \hat{O}(\bar{Y}(t))$, стан середовища $\Lambda(t)$ та цілей $Z^*(t)$:

$$U(t) = U(\Lambda(t), \bar{Y}(t), Z^*(t)). \quad (3)$$

Для ефективного використання ресурсів СРЗ в вузлах необхідно передбачити можливість використання множини методів доступу до СРЗ. Застосування конкретного методу доступу буде визначатися параметрами інформаційного навантаження, поточної метою управління мережею, ситуацією на мережі (її зоні) і прийнятими рішеннями на інших рівнях еталонної моделі [128-134].

Вважаємо, що мета ведення радіоелектронного придушення противника відома, відповідно, з використанням, наприклад, методик [133, 135] визначений перелік вузлів СРЗ, що підлягають радіоелектронному придушення та визначені

їх пріоритети, тобто деяка числова характеристика важливості того чи іншого вузла СРЗ у досягненні мети радіоелектронного конфлікту противником.

Генетичний алгоритм заснований на ідеї еволюції за допомогою природного відбору та являє собою штучну імітацію таких властивостей живої природи, як природний відбір, пристосованість до змінюваних умов середовища, спадкоємність нащадками властивостей батьків і та ін.

Метод синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму, алгоритм реалізації якого подано на рис. 1 складається з наступної послідовності дій.

Введення вихідних даних (дія 1).

На даному етапі вводяться вихідні параметри мережі, кількість вузлів СРЗ, швидкість передачі інформації та початкова радіоелектронна обстановка.

Сутність генетичного пошуку полягає в циклічній заміні однієї популяції наступною, більш пристосованою. Можна вважати, що вся популяція складається в часі з дискретних поколінь $\Omega^{(0)}, \Omega^{(1)}, \Omega^{(2)}, \dots, \Omega^{(T)}$. Покоління $\Omega^{(t+1)}$ – це сукупність особин, батьки яких належать поколінню $\Omega^{(t)}$. Покоління $\Omega^{(0)}$ є початковою популяцією. Процес формування покоління $\Omega^{(0)}$ називається *ініціалізацією*. Кожне наступне покоління є результатом циклу роботи генетичного алгоритму.

Для кожної особини поточного покоління визначається значення цільової функції, яке характеризує пристосованість особини. У ході *відбору (селекції)* найменш пристосовані особини гинуть, а найбільш пристосовані дістають можливість відтворити нащадків у ході попарного *схрещування*. Це приводить до появи нових особин, які наслідують від батьків деякі властивості. Таким чином, з покоління в покоління, гарні властивості розповсюджуються по всій популяції. Для підвищення різноманітності пошуку і більш повного дослідження простору пошуку застосовується *мутація* – введення в популяцію нових особин. Зрештою, популяція збігатиметься до найбільш пристосованої особини (до оптимального рішення).

Для використання властивостей особин популяції у генетичному алгоритмі ці властивості подаються в закодованому вигляді – у вигляді *хромосоми*. Хромосома являє собою сукупність *генів*, кожний з яких зберігає певну властивість (ознаку, характеристику) особини. В залежності від того, які властивості необхідно закодувати і, відповідно, які значення можуть приймати гени, розрізняють бінарні, числові та векторні хромосоми, а в залежності від структури простору пошуку хромосоми можуть бути одно-, дво- або багатомірними. Таким чином, генетичні оператори (схрещування, мутації, відбору) здійснюють перетворення хромосом без використання інформації про внутрішню структуру об'єкта досліджень.

Представлення топології мережі у вигляді хромосоми (дія 2).

При застосуванні генетичного алгоритму для синтезу раціональної топології СРЗ необхідно представити цю топологію у вигляді хромосоми, яка по суті являє собою математичну модель СРЗ з відображенням її елементів та суттєвих зв'язків між ними.

Відомо [130], що достатньо адекватною для вирішування задачі дослідження топології СРЗ є математична модель, яка зображується у вигляді матриці інцидентності, у якій номери рядків відповідають номерам джерел інформації, а номери стовпців — номерам споживачів інформації. Елементи a_{ij} на перетині рядків та стовпців набувають значення характеристики інформаційного зв'язку, що з'єднує відповідне джерело інформації з відповідним споживачем(зауважимо, що одні і ті ж вузли можуть бути і джерелами, і споживачами інформації).

$$C = \begin{pmatrix} & \begin{matrix} \text{споживачі інформації} \\ 1 & 2 & 3 & \dots & J \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{джерела} \\ \text{інформації} \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \dots \\ I \end{matrix} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1J} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{I1} & a_{I2} & a_{I3} & \dots & a_{IJ} \end{vmatrix} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

При числових розрахунках також виникає необхідність використання різновиду матриці інцидентності – ортонормованої матриці інцидентності, в якій

значення елементів можуть набувати значення 0 або 1. Така матриця може бути використана у тому випадку, якщо для дослідження є необхідність визначати наявність інформаційних зв'язків між відповідними елементами структури системи без визначення характеристики зв'язку.

Нескладно побачити аналогію між відображенням топології мережі у матрицю виду (4) та відображенням точки простору рішень у двомірну *хромосому*, що має місце у генетичному алгоритмі. Ортонормована матриця інцидентності (4) є двомірною *хромосомою* і може використовуватись для представлення топології СРЗ в генетичному алгоритмі.

Розвиваючи наведену вище аналогію, назвемо елементи матриці (4) генами, а декілька реалізацій матриці (4) з різними значеннями елементів (генів) – сукупністю *хромосом*, або *популяцією*. Зауважимо, що в загальному випадку структура *хромосоми* може бути і іншою. Це буде визначатись змістом задачі, що вирішується.

При визначенні числового значення характеристики зв'язків між елементами структури необхідно використовувати числові *хромосоми*, якщо ж визначається значення декількох характеристик зв'язку, необхідно використовувати *векторну хромосому*.

Пояснимо роботу окремих складових методу докладніше.

Ініціалізація початкової популяції (дія 3).

При ініціалізації початкової популяції $\Omega^{b(0)}$ випадковим чином створюються N_b *хромосом* – матриць виду (4). При цьому необхідно враховувати обмеження на вигляд матриць (4), що будуть визначатись характером задачі, що вирішується. Також обмеження на вигляд *хромосоми* повинні враховуватись при застосуванні оператора мутації, який полягає в заміні одного або декількох генів *хромосоми*, вибраної випадковим чином з множини $\Omega^{b(t)}$, на протилежне значення, що стосовно досліджуваної топології мережі означає створення або ж видалення зв'язків між її елементами.

В результаті у кожному циклі генетичного алгоритму формується популяція *хромосом-мутантів* $\Omega^{m(t)}$:

елементи стовбців – нулі;

інформація передається тільки на один вузол СРЗ – це означає, що у відповідних рядках матриці може бути тільки одна одиниця, інші елементи рядків – нулі;

вузол СРЗ може отримувати і обробляти дані не більше ніж від $N_{\text{ретр max}}$ вузлів-ретрансляторів СРЗ та передати інформацію не більше ніж $N_{\text{ВЗmax}}$ вузлам отримувачам.

Застосування операторів схрещування та мутації (дія 4)

При схрещуванні хромосоми поточної популяції $\Omega^{b(t)}$ випадковим чином розбиваються на пари. Оператор схрещування здійснює обмін генів хромосом кожної пари. В результаті формується популяція хромосом-нащадків $\Omega^{c(t)}$ чисельністю N_c . Схрещування потрібно виконувати з урахуванням обмежень на вигляд матриці (3), щоб в результаті не отримати хромосоми, відповідні яким структури створити неможливо. В прикладі, наведеному нижче (рис. 2), застосований блочний оператор схрещування для двовірних хромосом. При схрещуванні хромосоми здійснюють обмін генами, розташованими на ділянці, положення якої визначається випадковим чином з врахуванням наведених вище обмежень.

Розпізнавання варіанту дій РЕП та оцінка ефективності (дія 5) при варіанті топології $S \in \Omega^{\Sigma(t)}$, де $\Omega^{\Sigma(t)} = \Omega^{b(t)} \cup \Omega^{c(t)} \cup \Omega^{m(t)}$, здійснюється з використанням мультиагентного алгоритму, запропонованого в [137, 138]. На кожному t -му циклі роботи генетичного алгоритму для кожної хромосоми S множини $\Omega^{\Sigma(t)}$ розпізнається варіант дій РЕП та оцінюється його ефективність. Наступним кроком циклу генетичного алгоритму є *відбір* кращих N_b хромосом з популяції $\Omega^{\Sigma(t)}$ за значенням цільової функції (1). Отримані хромосоми утворюють нову популяцію $\Omega^{b(t+1)}$, яка являється початковою для наступного циклу генетичного алгоритму. Після виконання T циклів робота генетичного алгоритму припиняється.

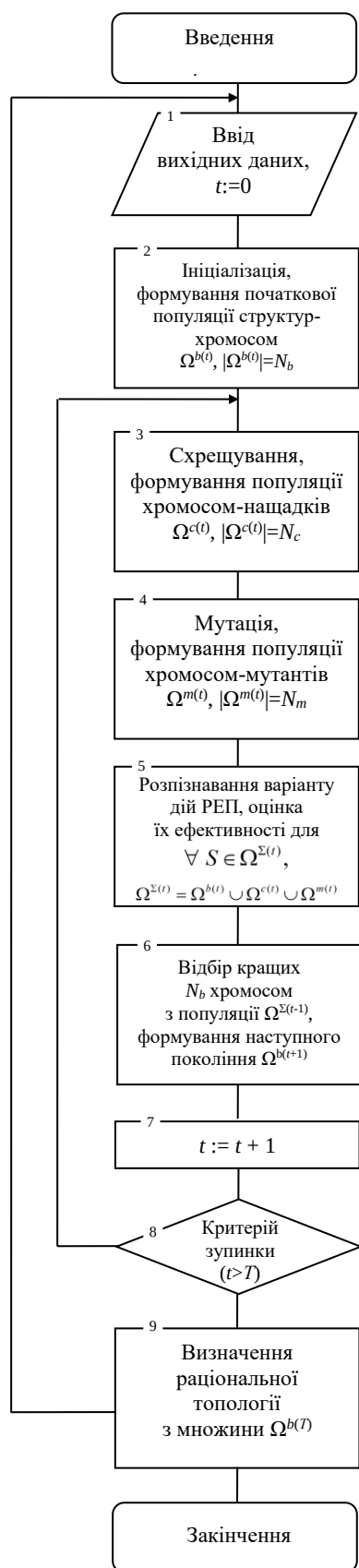


Рис. 1 Реалізація методу синтезу топології СРЗ з використанням генетичного алгоритму

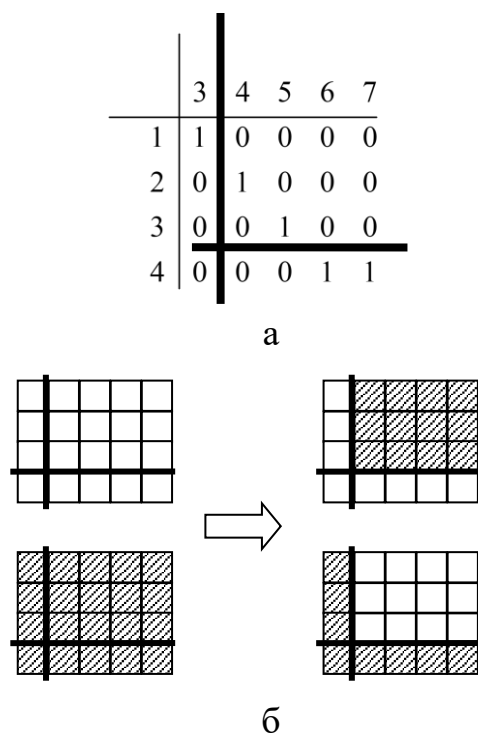


Рис. 2 Блочний оператор схрещування: а – визначення ділянки обміну генів двомірних хромосом; б – приклад застосування оператора схрещування

Проведення навчання СРЗ. Навчання системи відбувається на підставі одного з розроблених в роботах [133, 144] методів навчання.

Таким чином, буде виконана адаптація чи настроювання топології СРЗ в умовах невизначеності. Аналіз значень цільової функції (1) для отриманої множини хромосом $\Omega^{(T)}$ дозволяє визначити одну чи декілька раціональних топологій СРЗ.

Метод інтелектуального управління параметрами та режимами роботи систем радіозв'язку спеціального призначення в умовах складної радіоелектронної обстановки

Сутність новизни запропонованого методу в тому, що зазначений метод є сукупністю нових процедур, а саме [130, 131, 134, 136-154]:

процедури вибору робочих частот;

процедури вибору топології радіомережі;

процедури вибору маршруту передачі інформації;

процедури вибору режиму роботи засобів радіозв'язку.

Зазначені процедури в комплексі дозволяють проводити управління каналними та мережевими ресурсами. Кожна з перелічених вище процедур зазначеного методу є удосконаленою.

Розглянемо основні процедури методу інтелектуального управління параметрами СРЗ спеціального призначення.

1. Введення початкових даних. Вводяться дані СРЗ $\Psi = \{\psi_i\}$, а також значення допустимої величини ймовірності бітової помилки $P_{б\text{ доп}}$ та мінімально швидкості передачі інформації $v_{i\text{ доп}}$ для кожного з елементів системи радіозв'язку та допустимого навантаження в СРЗ.

2. Оцінка радіоелектронної обстановки.

Проводиться оцінювання радіоелектронної обстановки на ділянках мережі – вузлами-координаторами за сусідні вузли. На радіонапрямах – вузлами, що здійснюють передачу інформації за допомогою методу, що розроблений в третьому розділі дисертаційного дослідження [130, 131, 134, 136-154].

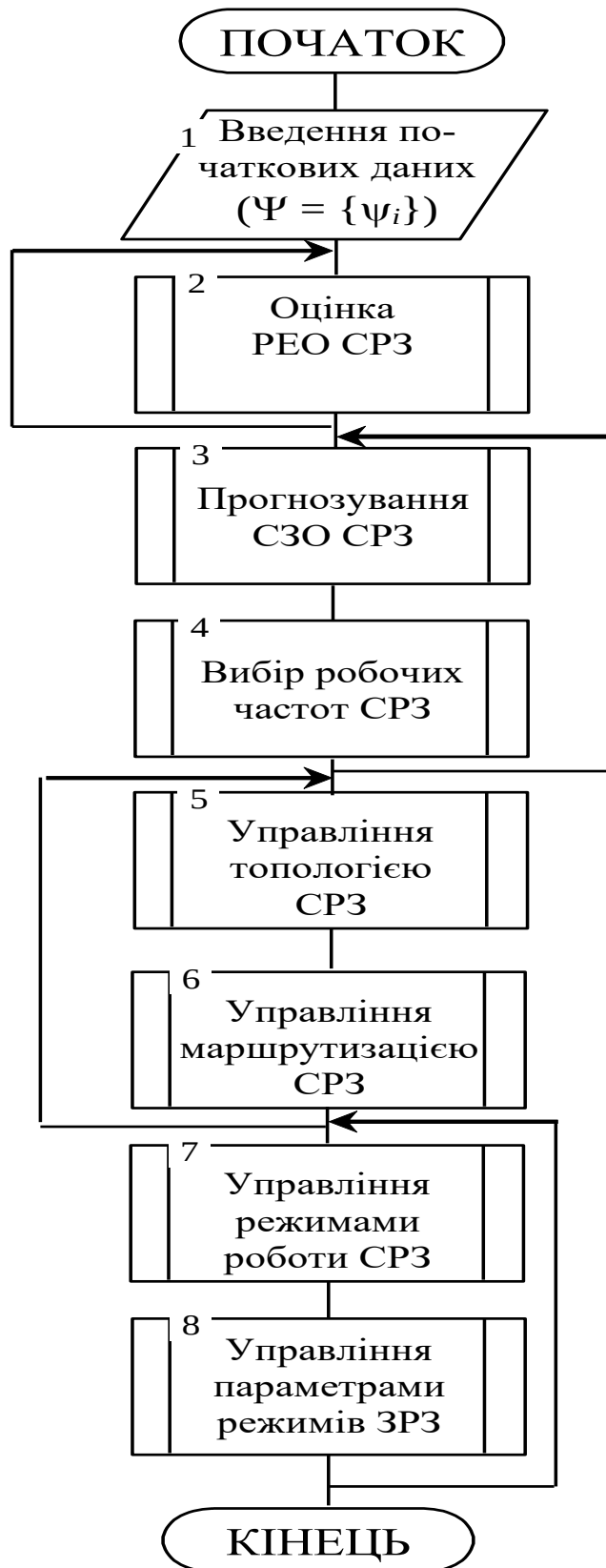


Рис. 3 Алгоритм методу інтелектуального управління параметрами СРЗ

3. Прогнозування стану радіоелектронної обстановки.

В основу даної процедури покладений метод оцінки та прогнозування стану СРЗ спеціального призначення, що розроблений в розділі 3 дисертаційного дослідження.

4. Вибір робочих частот СРЗ.

Проводиться аналіз радіочастотного ресурсу. Зазначена процедура відрізняється від відомих, тим що вибір робочих частот відбувається наступним чином:

визначення кількості придушених частотних діапазонів та ступеню їх придушення (коефіцієнтів перекриття стану каналу). Тобто якщо частотний канал придушений повністю то він відсіюється та вважається таким, що він не придатний для передачі інформації, якщо частково – на ньому можливо проводити передачу інформації з мінімальною пропускну здатністю з використанням високоенергетичних сигнально-кодових конструкцій, а якщо канал вільний від перешкод то передача інформації відбувається з використанням високошвидкісних сигнальних конструкцій;

визначаються еліпси суцільного придушення та зони порушення роботи засобів радіозв'язку;

з використанням методу нелінійного програмування визначаються стратегії комплексів радіоелектронного придушення противника;

на підставі даних отриманих після процедури прогнозування стану радіоелектронної обстановки проводиться вибір робочих частот.

На підставі зазначеної інформації відбувається формування раціональної топології СРЗ.

5. Формування топології СРЗ відбувається на підставі методу, що наведений в розділі 1 дослідження.

6. Управління маршрутизацією в СРЗ спеціального призначення.

Пошук найкоротшого шляху між парою точок є NP-важкою проблемою, яка вимагає перерахування всіх можливих маршрутів. Крім того, більшість користувачів сьогодні потребують не тільки маршрути з найменшою кількістю

переходів (хопів) до адресату, але й потребують маршрутів, які можуть задовольнити інші важливі потреби. Таким користувачам найчастіше потрібно забезпечувати підтримку QoS , мати можливість враховувати енергетичну складову [130, 131, 134, 136-154, 156-181] у зв'язку з тим, що в СРЗ спеціального призначення може бути значна кількість вузлів які працюють на акумуляторних батареях, врахування швидкості каналу зв'язку, час затримки між відправником пакету та його адресатом, кількість наявних маршрутів, надійність доставки пакету відповідним маршрутом.

Загальна структура запропонованої процедури маршрутизації складається з чотирьох основних компонентів [130, 131, 134, 136-154, 156-181], таких як: система підтримання маршрутів, система пошуку маршрутів, система прийняття рішення направлення IP пакетів та система пам'яті з якою взаємодіють всі вищезазначені системи.

Запропонована процедура використовує комбінацію алгоритму нечіткої логіки (FL) і систему колоній мурашок (ACS) для пошуку оптимального маршруту між парою вузлів NS/ND. Оптимальний маршрут відноситься до маршруту, який задовольняє всі бажані параметри необхідні для вибору кращого маршруту. Такими параметрами є: “QoS”, “швидкість каналу”, “надійність доставки пакетів”, “енергетична складова”, “час затримки End to End Delay” та “кількість наявних маршрутів” (рис. 4).

Основними кроками алгоритму визначення відправки IP пакету до вузла призначення процедури маршрутизації в СРЗ спеціального призначення є:

Крок 1. Збір даних стану вузлів в мережі до кешу стану вузлів в СРЗ.

Крок 2. Отримання запиту на відправку пакету до вузла призначення.

Крок 3. Перевірка наявності маршруту до вузла призначення. У разі відсутності маршруту в таблиці маршрутизації системою пошуку маршруту виконується пошук маршруту до вузла призначення (крок 4).

Крок 4. Система пошуку маршруту виконує запит пошуку маршруту.

Крок 5. У разі отримання відповіді на запит маршруту відбувається запис маршруту до кешу стану вузлів в СРЗ.

Крок 6. Фазифікація та дефазифікація показників маршруту.

Крок 7. Виконується пошук маршруту.

Крок 8. Формування бази даних маршрутів

Крок 9. Система прийняття рішення направлення IP пакетів з урахуванням наявних маршрутів в базі даних маршрутів приймає рішення щодо відправки IP пакету відповідним маршрутом до вузла призначення з врахуванням QoS.

Крок 10. Відправлення IP пакету до вузла призначення.

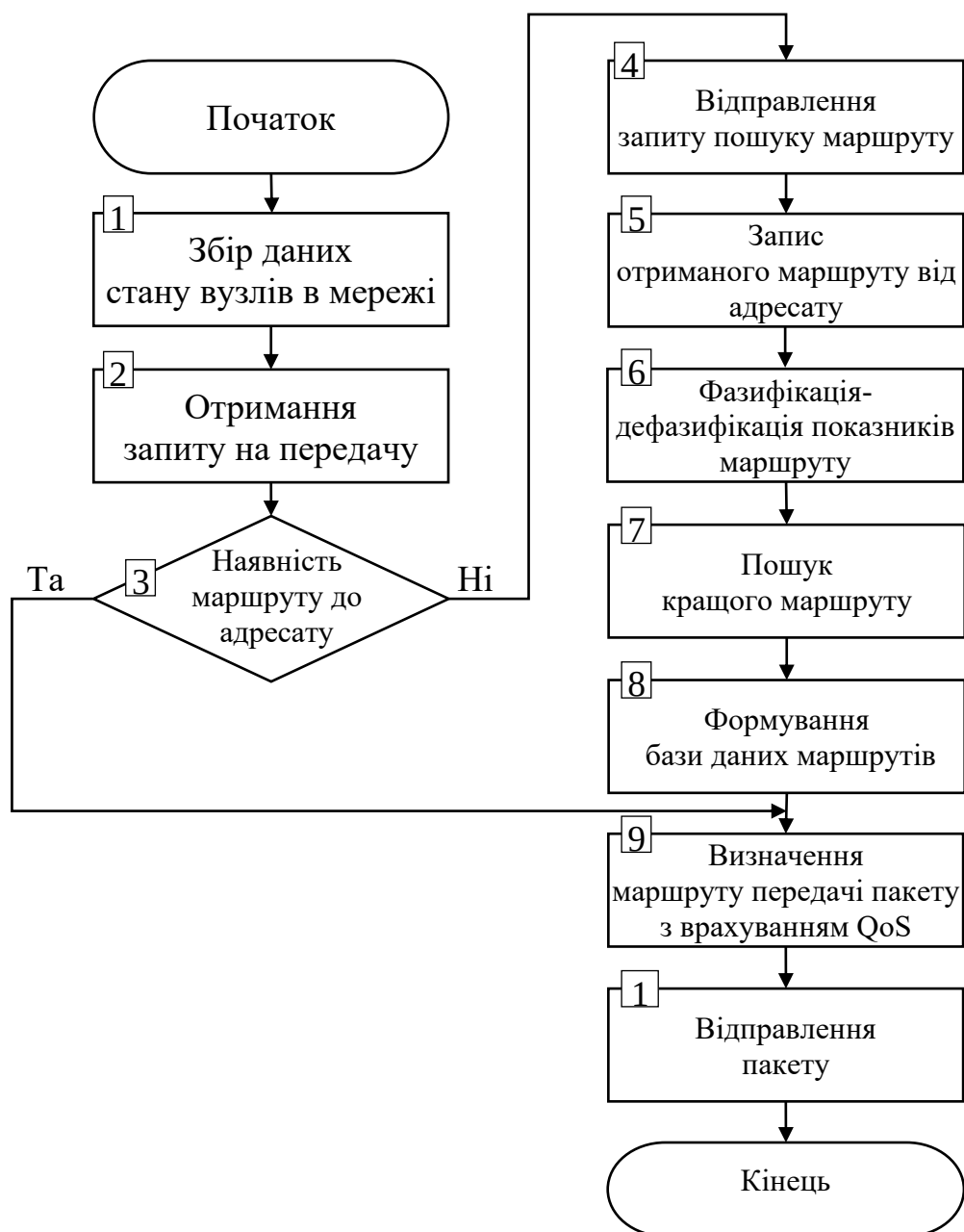


Рис. 4 Опис процедури маршрутизації в СРЗ спеціального призначення

Нечітка нейронна мережа (NFS – neuro-fuzzy system), запропонована для визначення маршрутів складається з п'яти шарів: функція лінійної передачі, фазифікації, операції «та», нечіткий умовивід та дефазифікація.

Шар 1. Функція лінійної передачі, тобто отримання показників вузлів в СРЗ призначення параметрів з прийнятих ІР пакетів. А саме: швидкість передачі інформації, час передачі пакету до вузла призначення, рівень заряду батареї вузла, надійність доставки ІР пакету.

За показник швидкості передачі інформації P_{speed} береться мінімальна швидкість передача інформації радіозв'язності між вузлами з усього маршруту, тобто

$$P_{speed} = \min V_{ij_{speed}}, \quad (5)$$

де V_{ij} – вузол, що приймає участь в передачі пакету на маршруті ij .

За показник заряду батареї, також визначається мінімальний заряд батареї на вузлі, який задіяний у маршруті

$$P_{power} = \min V_{ij_{power}}. \quad (6)$$

Затримка доставки пакету є сумою часу доставки ІР пакету всіх проміжних вузлів та таким чином показує час доставки пакету до вузла призначення на маршруті в цілому

$$P_{delay} = \sum_{i=1}^N V_{i_{delay}}. \quad (7)$$

Показником надійності передачі ІР пакету є ймовірнісним показником передачі пакету вздовж всього маршруту

$$P_{reliability} = \prod_{i=1}^N V_{i_{reliability}}. \quad (8)$$

Шар 2. Процес фазифікації для переходу від чіткого значення параметрів до нечіткого значення деякої лінгвістичної змінної. Для досягнення адаптивності протоколу маршрутизації до змін в мережі враховуються мінімальні та максимальні значення параметрів бази даних стану вузлів.

$$\xi_{ij_{speed}} = S(i, j, t), \text{ де } 0 \leq q \leq 1, 0 = \min P_{speed}, 1 = \max P_{speed}, \quad (9)$$

$$\xi_{ij_{power}} = P(i, j), \text{ де } 0 \leq q \leq 1, 0 = \min P_{power}, 1 = \max P_{power}, \quad (10)$$

$$\xi_{ij_{delay}} = S(i, j, t), \text{ де } 0 \leq q \leq 1, 0 = \min P_{delay}, 1 = \max P_{delay}, \quad (10)$$

$$\xi_{ij_{reliability}} = S(i, j, t), \text{ де } 0 \leq q \leq 1, 0 = \min P_{reliability}, 1 = \max P_{reliability}. \quad (12)$$

Кожен вузол цього шару представляє один терм функції належності. Побудова функцій належності для всіх чотирьох параметрів відповідно до рівнянь:

$$\mu_{Low}(x) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{\Delta - x}{\Delta}\right)\right), \quad (13)$$

функція належності визначає слабе (Weak) та середнє (Medium) значення параметру

$$\mu(k, x) = \max\left[0, \min\left[\frac{x - \Delta \cdot (k - 1)}{\Delta}, \frac{\Delta \cdot (k + 1) - x}{\Delta}\right]\right], \quad (14)$$

функція належності, що визначає високе (High) значення параметру

$$\mu_{High}(x) = \min\left(1, \max\left(0, \frac{x - (N - 1)\Delta}{\Delta}\right)\right). \quad (15)$$

$$\text{де } N = 3, \Delta = \frac{1}{N}, \mu(1, x) \equiv \mu_{Weak}(x), \mu(2, x) \equiv \mu_{Medium}(x).$$

Побудова функцій належності, що визначають загальну метрику маршруту тобто рівень феромону який буде залишати мураха після кожного проходу матиме вид:

$$\mu_{ph1}(x) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{\Delta - x}{\Delta}\right)\right), \quad (16)$$

$$\mu(k, x) = \max\left[0, \min\left[\frac{x - \Delta \cdot (k - 1)}{\Delta}, \frac{\Delta \cdot (k + 1) - x}{\Delta}\right]\right], \quad (17)$$

$$\mu_{ph13}(x) = \min\left(1, \max\left(0, \frac{x - (N - 1)\Delta}{\Delta}\right)\right), \quad (18)$$

$$\text{де } N = 12; \Delta = \frac{1}{N}; \mu(1, x) \equiv \mu_{ph2}(x), \mu(2, x) \equiv \mu_{ph3}(x), \mu(3, x) \equiv \mu_{ph4}(x),$$

$$\mu(4, x) \equiv \mu_{ph5}(x), \mu(5, x) \equiv \mu_{ph6}(x), \mu(6, x) \equiv \mu_{ph7}(x), \mu(7, x) \equiv \mu_{ph8}(x),$$

$\mu(8, x) \equiv \mu_{ph9}(x)$, $\mu(9, x) \equiv \mu_{ph10}(x)$, $\mu(10, x) \equiv \mu_{ph11}(x)$, $\mu(11, x) \equiv \mu_{ph12}(x)$,
 $\mu(12, x) \equiv \mu_{ph13}(x)$ – функції рівня феромону.

Шар 3. Кожна нечітка система реалізується у вигляді нечітких правил. Нечіткі правила виконує логічні операції “та” чи “або” . Даний шар мережі має кількість вузлів відповідну до кількості операцій “та”. Так для повного перебору 4 параметрів, кожен з яких має по 4 терми необхідно 256 нейронів, що відповідають усім можливим варіаціям термів параметрів.

$$\text{якщо } P_{speed} \in A_x \text{ та } P_{power} \in B_x \text{ та } P_{delay} \in C_x \text{ та } P_{reliability} \in D_x \text{ то ,} \quad (19)$$

де A_x, B_x, C_x, D_x – функції належності визначені відповідно на $P_{speed}, P_{power}, P_{delay}, P_{reliability}$. Тобто на вході нейрон третього шару матиме вид:

$$\text{If } I_1 \text{ is Low and } I_2 \text{ is Low and } I_3 \text{ is High and } I_4 \text{ is Low then .} \quad (20)$$

На виході нейрона третього шару відбувається агрегування передумов нечітких правилах та визначається за виразом, що є логічною кон'юнкцією, якщо $\mu_g = \mu(P_{speed} \cap P_{power} \cap P_{delay} \cap P_{reliability})$ то:

$$\mu_g = \min \{ \mu(P_{speed}), \mu(P_{power}), \mu(P_{delay}), \mu(P_{reliability}) \} . \quad (21)$$

Шар 4. Є активізація висновків нечіткого правила. На четвертому рівні на кожній з відповідних входних комбінацій які були на вході визначається конкретний вихід. Так для прикладу нейрон четвертого шару буде мати вигляд:

$$\text{If } I_1 \text{ is Low and } I_2 \text{ is Low and } I_3 \text{ is High and } I_4 \text{ is Low then } O \text{ is Ph1.} \quad (22)$$

Шар 5. Нечіткий результат, який є результатом висновків, перетворюється на реальне значення, яке може використовуватися як керуючий вхід. Оскільки бажаний вихід є невиразним результатом, то кількісне значення керуючого виходу визначається шляхом дефазифікації. В процедурі використовується метод центру тяжіння. Визначення центру тяжіння вираховується за виразом

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x_i \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) \cdot dx} , \quad (23)$$

де – y є результат дефазифікації, x є вихідна лінгвістична змінна ω , $\mu(x)$ є функцією приналежності нечіткої множини, яка відповідає вихідній змінній ω після етапу акумуляції, $\min$, $\max$ є правою та лівою точкою інтервалу носія нечіткої множини вихідної змінної ω .

Шар 6. Є функція активації нейронів часто є неперервною і нелінійною функцією, яка називається сигмоподібною функцією і визначається як

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(ax^2)}, \quad (24)$$

де a – константа та $a \geq 0$.

Процедура пошуку маршруту на основі нечіткої логіки та системи мурашиних колоній, що має наступні кроки:

Крок 1. *Ініціалізація*. Вона складається з початкових значень параметрів алгоритму, таких як кількість мурах, коефіцієнт випаровування феромону, швидкість передачі інформації, заряд батареї, час передачі пакету, надійність передачі пакету.

Крок 2. *Початкове виставлення мурах*. На цьому етапі мурахи розташовуються на початкових точках з яких відбуватиметься ітерація. Активний мурашка відноситься до мурашки, який ще не прибув до місця призначення і не заблокований на вершинах (вузлах). Оскільки кожен мураха може проходити кожну вершину (вузол) один раз в кожній ітерації, мураха блокується в місці з'єднання, коли він не має шансів продовжити свій перехід до пункту призначення і не має можливого шляху для переміщення назад.

Крок 3. *Побудова ймовірних маршрутів*. На цьому етапі ймовірність кожного можливого прямого маршруту обчислюється на основі його функції витрат для кожної активної мурахи. Ймовірнісний перехід мурашок між вузлами також може бути заданий як правило переходу вузла. Ймовірність переходу k -ю мурахою від вузла i до вузла j задається:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{h \notin tabu_k} (\tau_{ih})^\alpha (\eta_{ih})^\beta} & j \notin tabu_k, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (25)$$

де τ_{ij} та η_{ij} інтенсивність феромонів і вартість маршруту між вузлами i та j , відповідно. Відносне значення τ_{ij} та η_{ij} контролюються параметрами α та β , відповідно. $tabu_k$ це список недоступних маршрутів (відвіданих вузлів) для мурахи k .

Крок 4. *Вибір маршруту*. Випадковий параметр $0 \leq q \leq 1$ з однаковою ймовірністю порівнюється з параметром Q , де $0 \leq Q \leq 1$. Результат порівняння між Q і q бере один з двох методів вибору активною мурахою маршрут наступного переходу таким чином:

$$j = \begin{cases} \arg \max (p_{ih}^k) & q > Q, \\ \text{Колесо рулетки} (p_{ih}^k) & \text{інакше.} \end{cases} \quad (26)$$

Якщо q більший Q , активний мураха вибирає маршрут з найбільшою ймовірністю, інакше, правило колеса рулетки вибирається для вибору наступного переходу через ймовірності.

Крок 5. *Оновлення списку Tabu*. На цьому етапі маршрут (вибраний вузол), який мурахою k було вибрано, додано до переліку в таблиці. Це направлення не буде повторно обрано, а його ймовірність більше не обчислюється.

Якщо мураха k дійшла до пункту призначення або була заблокована на вершині (вузлі), цей крок деактивує заблоковану чи прибувшу у поточній ітерації мураху.

Крок 6. *Оновлення феромону*.

Система феромонів ACS складається з двох основних правил: спочатку застосовується під час побудови рішень (локальне правило оновлення феромонів), а друге правило застосовується після того, як всі мурашки закінчили побудову рішення (правило оновлення глобальної феромони). Сума феромонів маршруту між переходами i та j оновлюється для k -ї мурашки як:

$$\tau_{ij}^{new} = \tau_{ij}^{old} + (10 \times \Delta\tau) \quad (27)$$

де – $\Delta\tau$ кількість місцевого оновлення феромонів. Значенням $\Delta\tau$ є вихідна система FL.

Кеш тимчасових маршрутів містить інформацію про маршрутизацію необхідну для вузла.

База знань зберігає всі вивчені маршрути з показниками залишкового заряду батареї, швидкості передачі даних, час затримки на маршруті, надійності маршруту, завантаженості маршруту та кількості ретрансляцій (хопів). База даних наповнюється шляхом вивчення інформації про маршрут з пакетів передачі даних, та з пакетів запиту маршрутів.

На основі бази знань відбувається формування таблиці маршрутизації.

Відбувається формування вартості маршруту за допомогою нечіткої логіки, використовуючи модифікований алгоритм мурашиних колоній виконується пошук найкращого маршруту, та в подальшому знайдені маршрути записувати до таблиці маршрутизації.

До таблиці маршрутизації записуються не більше чотирьох наявних маршрутів. У разі перевищення кількості маршрутів до вузла призначення вибираються шляхом ранжування кращі чотири маршрути. Наявність декількох маршрутів в таблиці маршрутизацію дає змогу робити балансування завантаженості маршрутів.

7. Вибір режиму роботи ЗРЗ (дія 7).

Для вибору режиму роботи ЗРЗ пропонується використовувати енергетичну та частотну складову використання ресурсів системи (їх ефективності). Границі між енергетичною та частотною ефективністю не задовольняють вимогам для зміни режиму роботи, тому для уточнення пропонується ввести додатковий показник, а саме важливість радіоелектронної обстановки.

Згортка часткових критеріїв якості до загального здійснюється з використанням певної схеми компромісів, яка визначає конкретний принцип оптимальності

$$F_{opt} = \max F(I_m, \beta_E, C), \quad (28)$$

де F_{opt} – режим роботи засобу радіозв'язку, I_m – коефіцієнт важливості радіоелектронної обстановки.

Відповідно до [160-162] важливість показників РЕО можна розглядати як неметричний критерій корисності (НКК).

В якості робочих режимів обрано гібридні режими роботи на основі багатоантенних систем, а саме:

MIMO-OFDM (Multiple-Input Multiple-Output with Orthogonal Frequency Division Multiplexing);

MIMO-UWB (Multiple-Input Multiple-Output with Ultra wideband signal);

MIMO-FHSS (Multiple-Input Multiple-Output with Frequency-Hopping Spread Spectrum).

Неметричні часткові критерії корисності (НЧКК), які мають характеризувати режим роботи виступають:

частотна ефективність ЗРЗ (β_F);

пропускна спроможність, ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ

Представимо основні НЧКК за допомогою кількісних характеристик (табл.1).

Таблиця 1– НЧКК для вибору режиму роботи ЗРЗ

НЧКК	Кількісна характеристика показника	Області зміни показників	Показники, що враховуються при визначенні важливості РЕО
β_E	Енергетична ефективність ЗРЗ	0,1-0,4	MIMO-OFDM
		0,401-0,79	MIMO-UWB
		0,801-1,0	MIMO- FHSS
C	Пропускна спроможність	0,81-1,0	MIMO-OFDM
		0,41-0,79	MIMO-UWB
		0,1-0,4	MIMO-FHSS
X_{PEB}	ступінь використання радіочастотного ресурсу засобами РЕБ	0,1-0,8	Перешкоди в частині смуги
		0,801-1	Загороджувальні перешкоди

НЧКК	Кількісна характеристика показника	Області зміни показників	Показники, що враховуються при визначенні важливості РЕО
Im	Важливість РЕО	0,1-0,4	Низький
		0,401-0,79	Середній
		0,801-1,0	Високий

8. Вибір параметрів сигналу для режиму роботи (дія 8).

Для кожного з режимів, проводиться вибір раціональних значень параметрів сигналу, де здійснюється початкове введення параметрів ЗРЗ та каналу зв'язку, відбувається вибір раціональних значень параметрів для кожного з режимів.

Метод комплексного управління ресурсами систем зв'язку спеціального призначення

Пропонується проводити наскрізне управління ресурсами СРЗ спеціального призначення з відносним дотриманням ієрархії на кожному з рівні еталонної мережевої моделі взаємодії відкритих систем OSI. Під ресурсами СРЗ спеціального призначення розуміється управління [130, 131, 134, 136–181]:

- просторовим ресурсом;
- часовим ресурсом;
- частотним ресурсом;
- резервом ЗРЗ.

До дестабілізуючих факторів відноситься:

- перешкоди навмисного походження;
- природні завади;
- кібератаки, направлені на відмову в обслуговуванні;
- вогневе ураження елементів системи зв'язку спеціального призначення.

Метод комплексного управління ресурсами СРЗ спеціального призначення складається з наступної послідовності дій (рис. 5).

1. *Введення вихідних даних.* Вводяться вихідні дані про стан СРЗ спеціального призначення, вид операції угруповання військ (сил), а також завдання з організації зв'язку в угрупованні військ (сил).

2. *Введення інформації про ступінь апіорної невизначеності про стан СРЗ.*

На даному етапі відбувається визначення ступеню невизначеності даних про стан СРЗ спеціального призначення на підставі робіт [144–149, 156]. Можливі ступені невизначеності інформації про стан СРЗ спеціального призначення: повна обізнаність, часткова невизначеність, повна невизначеність.

3. *Визначення управляючих впливів на СРЗ спеціального призначення.* На даному етапі на підставі опису стану СРЗ спеціального призначення визначаються управляючі впливи на фізичному, каналному та мережевому рівнях системи зв'язку спеціального призначення. В основу зазначеної процедури удосконаленого методу покладені розроблені в попередніх дослідженнях підходи [129, 130, 144, 145, 164].



Рис. 5. Алгоритм реалізації методу комплексного управління ресурсами
СРЗ спеціального призначення

4. *Прогнозування стану СРЗ спеціального призначення.* На даному етапі відбувається прогнозування стану СРЗ спеціального призначення з визначеним складом сил та засобів зв'язку. Прогнозування стану СРЗ спеціального призначення на даному етапі відбувається за допомогою розробленого в попередніх дослідженнях підходів [129-147, 149-160].

5. *Визначення необхідних сил та засобів зв'язку, які необхідні для нарощування СРЗ спеціального призначення.*

Прийняття рішення про нарощування складу сил та засобів зв'язку угруповання військ (сил) приймається після неможливості вирішення завдань з організації зв'язку у існуючій організаційно-штатній структурі після дії 4.

Розглянемо детальніше зазначену процедуру визначення необхідних сил та засобів зв'язку в СРЗ спеціального призначення. Завдання синтезу інформаційної технології управління процесами скоординованого функціонування та комплексного управління ресурсами систем спеціального призначення може бути сформульована як “завдання пошуку оптимальних керуючих впливів”. Зазначені завдання переводять СРЗ спеціального призначення, що розглядається, із заданого в необхідний структурний стан, що характеризує як поточний стан об'єктів, що входять в заданий тип структури, і стан відносин поміж них.

Таким чином, необхідно значення стану існуючої та “нової” системи зв'язку угруповання військ (сил) $CTC < U^t, S_{\delta}^{*tf} >$ при яких [130, 134, 136, 145, 159]:

$$J_{\theta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{<\chi, \chi'>}^t, \Pi_{(\delta, \delta)}^t, t \in (t_0, t_f] \right) \rightarrow \underset{<U^t, S_{\delta}> \in \Delta g}{extr_{*tf}} \\ \Delta_g \left\{ <U^t, S_{\delta}^{*tf}> \left| R_{\beta} \left(X_{\chi}^t, \Gamma_{\chi}^t, Z_{\chi}^t, F_{<\chi, \chi'>}^t, \Pi_{(\delta, \delta)}^t \right) \leq \tilde{R}_g \right. \right\} \quad (29) \\ U^t = \prod_{<\delta_1, \delta_2>}^{t_1} \circ \prod_{<\delta_2, \delta_3>}^{t_2} \prod_{<\delta, \delta>}^{t_f}; \beta \in \mathbf{B},$$

де J_{θ} – вартісні, часові, ресурсні показники, що характеризують якість функціонування СРЗ спеціального призначення; $\theta \in \Theta$ – множина номерів показників; χ – множина індексів, що відповідають структурам СРЗ спеціального призначення; $T \in (t_0, t_f]$ – інтервал часу, на якому функціонує СРЗ та реалізується

процес організації зв'язку; $X_{\chi}^t = \{X_{\chi l}^t, l \in L_{\chi}\}$ – множина елементів, що входять до складу структури динамічного альтернативного системного графа (ДАСГ) G_{χ}^t (множина вершин ДАСГ), за допомогою якого задається керована структурна динаміка СРЗ спеціального призначення в момент часу t ; $\Gamma_{\chi}^t = \{\chi_{\langle \chi l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множина дуг ДАСГ типу G_{χ}^t , відображають взаємозв'язки між його елементами в час t ; $Z_{\chi}^t = \{z_{\langle \chi l, l' \rangle}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$ – множина значень параметрів, кількісно характеризують взаємозв'язок відповідних елементів ДАСГ; $F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t$ – опис впливу різних структур СРЗ спеціального призначення один на одного в момент часу t ; $\prod_{\langle \tilde{\delta}, \tilde{\delta} \rangle}^t$ – композиції структурного стану СРЗ спеціального призначення з номерами $\tilde{\delta}, \tilde{\delta}$ в момент часу t ; Δ_g – множина динамічних альтернатив (множина структур та параметрів СРЗ спеціального призначення, “нової” та існуючої СРЗ спеціального призначення, а також множин програм їх функціонування); U^t – управляючі впливи, що дозволяють синтезувати структури СРЗ спеціального призначення, що нарощується і впроваджується; $\tilde{R}_g$ – задані величини; «о» – операція композиції відображень; **В** – множина номерів просторово-часових, технічних та технологічних обмежень, що визначають процеси реалізації програм нарощування та функціонування системи зв'язку спеціального призначення [130, 134, 136, 145, 159].

На етапі нарощування насамперед відбувається зміна параметрів функціонування елементів та підсистем СРЗ спеціального призначення.

У дослідженні пропонується розглянути СРЗ спеціального призначення як складний динамічний об'єкт, що складається з сукупності структур. Зв'язок між якими відбувається шляхом передачі інформації про статус операцій, інтенсивності потоків передачі та обробки даних, а також інформації про стані різних ресурсів, сервісів та базових послуг. Подібний підхід дозволяє представити етап паралельного функціонування та нарощування СРЗ спеціального призначення як процес оновлення (покращення характеристик) інформаційних послуг, що підтримують СРЗ спеціального призначення.

Представимо процес програмного управління нарощуванням системи зв'язку спеціального призначення:

$$\frac{dx_n^{(s,l)}}{dt} = \sum_{r=1}^{p_s} u_{nr}^{(s,l)}(t); \quad (30)$$

$$\frac{dx_n^{(s,l)}}{dt} = \sum_{n=1}^{m_j} w_{nr}^{(s,l)}(t); \quad (31)$$

$$\frac{dx_{rS_l}^{(s,l)}}{dt} = \omega_{rS_l}^{(s,l)}(t). \quad (32)$$

Обмеження на керуючі дії:

$$0 \leq u_{nr}^{(s,l)}(t) \leq \left[e_{nr}^{(s,l)} \left(1 - \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right) + \bar{e}_{nr}^{(j)} \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right] w_{nr}^{(s,l)}; \quad (33)$$

$$\sum_{l=1}^{k_v} \sum_{n=1}^{m_j} V_n^{(s,l)} w_{nr}^{(s,l)}(t) \leq \left[V_r^{(j)} \left(1 - \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right) + \bar{V}_r^{(j)} \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right]; \quad (34)$$

$$\sum_{l=1}^{k_v} \sum_{n=1}^{m_j} u_n^{(s,l)}(t) \leq \left[P_r^{(j)} \left(1 - \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right) + \bar{P}_r^{(j)} \gamma_r^{(m,\delta)}(t) \right]; \quad (35)$$

$$\sum_{r=1}^{p_s} w_{nr}^{(s,l)}(t) \left[\sum_{\pi \in G_c} \left(\alpha_{\pi}^{(s,l)} - x_{\pi}^{(s,l)} \right) + \sum_{k \in G_c} \left(\alpha_k^{(m,r)} - x_k^{(m,r)} \right) \right] = 0, \forall l; \quad (36)$$

$$\sum_{r=1}^{p_s} w_{nr}^{(s,l)}(t) \leq \varepsilon_n, \forall n; \sum_{n=1}^{m_j} w_{nr}^{(s,l)}(t) \leq \theta_r, \forall r; \quad (37)$$

$$\omega_{rS_l}^{(s,l)} \left(a_{S_l}^{(s,l)} - x_{S_l}^{(s,l)} \right) = 0; \quad (38)$$

$$w_{nr}^{(s,l)} \in \left\{ 0, u_{vln}^{(b,j)} \right\}; \gamma_r^{(m,\delta)}(t), \omega_{rS_l}^{(s,l)} \in \{0, 1\}. \quad (39)$$

Крайові умови:

$$\text{для } t = t_0 : x_n^{(s,b)}(t_0) = x_r^{(s,l)}(t_0) = x_{rS_l}^{(s,l)}(t_0) = 0; \quad (40)$$

$$\text{для } t = t_f : x_n^{(s,l)}(t_f) = a_n^{(s,l)}; x_r^{(s,l)}(t_f), x_{rS_l}^{(s,l)}(t_f) = x_{rS_l}^{(s,l)}(t_0) \in \mathbf{R}^1.$$

Показники якості програмного управління нарощуванням СРЗ спеціального призначення:

$$J_4 = \sum_{n=1}^{m_j} \sum_{r=1}^{p_s} \int_{t_0}^{t_f} \delta_{nr}^{(s,l)}(\tau) \cdot w_{nr}^{(s,l)}(\tau) d\tau; \quad (41)$$

$$J_5 = \sum_{l=1}^{k_v} \sum_{r=1}^{p_s} \sum_{n=1}^{m_j} \int_{t_0}^{t_f} c_{nr}^{(s,l)}(\tau) w_{nr}^{(s,l)}(\tau) d\tau; \quad (42)$$

$$J_6 = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^{k_v} \sum_{n=1}^{m_j} \left(\alpha_n^{(s,l)} - x_n^{(s,l)}(t_f) \right)^2. \quad (43)$$

У співвідношеннях (4.30) – (4.43) прийнято такі позначення:

$x_r^{(s,l)}$ – змінна характеризує стан виконання операції надання необхідних інформаційних послуг для виконання завдань зв'язку $A_v^{(b,j)}$; Верхній індекс «s» означає, що відповідна змінна входить до складу моделі програмного управління нарощуванням СРЗ спеціального призначення.

Верхній індекс «l» означає операцію службову інформацію СРЗ спеціального призначення, який “споживає” інформаційний сервіс (послугу).

$u_{nr}^{(s,l)}(t)$ – інтенсивність підтримки, $F_{<n,r>}^{(s,l)}$ операції сервісу (внутрішнього сервісу) ресурсом СРЗ спеціального призначення $B_r^{(s,l)}$;

$x_r^{(s,l)}$ – змінна, поточне значення якої чисельно дорівнює загальній тривалості залучення ресурсів СРЗ спеціального призначення $B_r^{(s,l)}$;

$w_{nr}^{(s,l)}(t)$ – тривалість використання $B_r^{(s,l)}$ ресурсу СРЗ спеціального призначення для підтримки інформаційного сервісу (внутрішніх сервісів або послуг) $D_{<l,n>}^{(s,b)}$ $w_{nr}^{(s,l)}(t) = 1$ якщо ресурс СРЗ спеціального призначення виділено та функціонує;

$x_{rs_l}^{(s,l)}$ – чисельно визначає часовий інтервал від закінчення обслуговування СРЗ спеціального призначення $B_r^{(s,l)}$ внутрішнього сервісу $F_{<n,r>}^{(s,l)}$ до заданого кінцевого моменту часу;

$\omega_{sl}^{(s,l)}(t)$ – це допоміжна керуюча дія. Приймає значення “1”, якщо СРЗ спеціального призначення завершила обслуговування внутрішнього сервісу $F_{<n,r>}^{(s,l)}$;

$V_n^{(s,l)}$ – обсяг пам'яті, необхідної для зберігання вихідних та проміжних даних, що виділяється для виконання операції внутрішнього обслуговування;

$e_r^{(j)}, V_r^{(j)}, P_r^{(j)}$ – задані величини (константи), що характеризують максимальну інтенсивність реалізації внутрішніх сервісів на ресурсі СРЗ

спеціального призначення $B_r^{(s,l)}$ (до нарощування);

$\gamma_r^{(m,\delta)}(t)$ – допоміжна керуюча дія, що приймає значення «1» у момент часу t , якщо здійснено перехід від існуючих $(e_r^{(j)}, V_r^{(j)}, P_r^{(j)})$ до нових $\bar{e}_r^{(j)}, \bar{V}_r^{(j)}, \bar{P}_r^{(j)}$ параметрам інформаційних ресурсів B_j у підсистемі СРЗ спеціального призначення.

$a_n^{(s,l)}$ – обсяг операцій внутрішнього сервісу для підтримки заданого зовнішнього обслуговування;

$\delta_{nr}^{(s,l)}(t)$ – функція дозволяє оцінити сумарну якість надання $F_{<n,r>}^{(s,l)}$ внутрішніх сервісів СРЗ спеціального призначення на етапі спільного функціонування та нарощування.

$c_{nr}^{(s,l)}(t)$ – вартісна функція часу, що описує непрямі, тобто експлуатаційні витрати (адміністрування, технічна підтримка тощо), пов'язані з функціонуванням та нарощуванням конкретного інформаційного сервісу.

Висновки

1. Запропоновано метод синтезу раціональної топології СРЗ спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму. Структура СРЗ представляється у вигляді двомірної матриці інцидентності. Ця матриця використовується як хромосома операторами генетичного алгоритму. Елементи матриці інцидентності, що описують зв'язки між елементами СРЗ, у генетичному алгоритмі являються генами. В кожному циклі генетичного алгоритму здійснюється попарне схрещування хромосом, в ході якого здійснюється обмін частини генів, що для досліджуваної мережі означає появу та зникнення відповідних зв'язків між елементами. Розрахунок значень цільової функції (ступеню радіоелектронного придушення) пропонується здійснювати з використанням мультиагентного алгоритму, при цьому для кожної хромосоми поточної популяції спочатку розпізнається варіант дій РЕП. Виграш від реалізації зазначеного методу складає від 9 до 14 % за рахунок скорочення часу на прийняття рішення на вибір топології СРЗ спеціального призначення.

2. Запропоновано метод інтелектуального управління параметрами СРЗ спеціального призначення. Відмінність запропонованого методу від відомих полягає у комплексному управлінні параметрами фізичного, каналного та мережевого рівня СРЗ спеціального призначення. Запропонований метод дозволяє проводити вибір робочих частот засобів радіозв'язку з урахування стратегії засобів радіоелектронної боротьби; дозволяє обрати раціональну топологію мережі, обрати раціональний маршрут передачі інформації та дозволяє обрати режим роботи засобу радіозв'язку з урахуванням пропускної спроможності СРЗ. Виграш в діапазоні 10–16 % був отриманий в ході оперативного контролю поточного стану і заводової обстановки в каналах, зайнятих під передачу, за час, порівняний із тривалістю циклу обміну інформацією. Неоднозначність визначення стану каналів викликано різними параметрами сигналу, що приймається, в зв'язку з різними траєкторіями проходження сигналу та рівнями сигнал/шум в підканалах.

3. Запропоновано метод комплексного управління ресурсами СРЗ спеціального призначення.

Зазначений метод дозволяє: провести визначення впливу дестабілізуючих факторів на СРЗ спеціального призначення та визначити кількість необхідних сил та засобів зв'язку радіозв'язку, які необхідно наростити для повноцінного функціонування СРЗ спеціального призначення при впливі засобів радіоелектронної боротьби, вогневого ураження та кібер впливу. Зазначений метод дозволяє підвищити ефективність функціонування системи спеціального зв'язку при впливі дестабілізуючих факторів на 20–26 %, що підтверджується результатами моделювання.