

М. Ю. Яковлев, А. П. Волобуєв, Ю. Б. Прібилєв

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ У ПРОЦЕСІ ЇЇ ЗАХИСТУ ВІД РАДІОРОЗВІДКИ РАДІООБМІНОМ ЗА РАЦІОНАЛЬНИМИ МАРШРУТАМИ

Наведено загальні положення і розкрито сутність підходу до побудови математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами. Розглянуто основні складники математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю. Запропоновано загальну структуру математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами.

Ключові слова: модель, математичне моделювання, автоматизовані системи, військовий радіозв'язок, маршрути інформаційного обміну, коефіцієнт розвідувальної доступності, навчальна матеріально-технічна база, підготовка військ, тренажерна база, тренажерний комплекс, штучний інтелект, алгоритми функціонування, захист від радіорозвідки.

Постановка проблеми. Протистояння повномасштабному російському вторгненню в Україну супроводжується набуттям нових спроможностей як сучасними (і перспективними) засобами радіозв'язку, так і засобами радіорозвідки, що приводить до суттєвих змін у функціонуванні систем військового радіозв'язку під час їхнього захисту від радіорозвідки. Невід'ємним складником цього питання є побудова математичних моделей функціонування систем військового радіозв'язку у процесі їхнього захисту від радіорозвідки.

Наявна методологія побудови математичних моделей функціонування систем військового радіозв'язку у процесі їхнього захисту від радіорозвідки певною мірою не відповідає тим потребам, які необхідні для проведення досліджень щодо функціонування сучасних і перспективних автоматизованих систем військового радіозв'язку у процесі їхнього захисту від сучасних і перспективних засобів радіорозвідки. І пояснюється це насамперед тим, що бракує математичних моделей, які б відповідали перспективним варіантам функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Напрямок дослідження, зазначений у статті, розглянуто у низці публікацій українських і закордонних вчених [1–13]. У цих публікаціях розроблено математичні моделі функціонування засобів і систем військового радіозв'язку у процесі їхнього захисту від радіорозвідки з урахуванням понад двох десятків різноманітних показників рівня їх радіомаскування. Запропоновані математичні моделі мають переважно ймовірнісний характер, тому перевірка їхньої адекватності передбачає наявність великого обсягу статистичного матеріалу, що не завжди є можливим. Крім того, застосування наведених моделей ускладнюється тим, що системи радіорозвідки нового покоління спроможні викривати засоби військового радіозв'язку майже миттєво з імовірністю, близькою до одиниці, за умови їх розвідувальної доступності. Наявні моделі побудовані з урахуванням спроможностей засобів радіозв'язку та засобів радіорозвідки старого парку і базуються здебільшого на застосуванні такої енергетичної характеристики, як співвідношення сигнал/шум. При цьому нехтується процес прийняття рішень щодо наявності корисних сигналів на виходах приймачів як засобів радіорозвідки противника, так і засобів радіозв'язку своєї системи.

Отже, у цих дослідженнях практично не враховано спроможності сучасних і перспективних засобів радіозв'язку, засобів радіорозвідки та специфіку процесу прийняття рішень щодо наявності корисних сигналів на виходах їхніх приймачів.

Метою статті є розкрити зміст підходу до побудови математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами.

Виклад основного матеріалу. Згідно із загальними положеннями теоретичних основ методології математичного моделювання функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки, математична модель функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними

маршрутами з низькою розвідувальною доступністю має чотири базові блоки: блок отримання й аналізу інформації про поточний стан засобів радіозв'язку, системи радіорозвідки противника, фізико-географічні умови в операційному районі як середовищі поширення електромагнітних хвиль; блок моделювання підпроцесу формування можливих маршрутів радіообміну; блок моделювання підпроцесу оцінювання поточних значень коефіцієнта розвідувальної доступності можливих маршрутів радіообміну з урахуванням різних режимів роботи засобів радіозв'язку на окремих їх ділянках; блок моделювання підпроцесу визначення раціональних маршрутів радіообміну серед множини можливих.

Базовий блок отримання й аналізу інформації про поточний стан засобів радіозв'язку, системи радіорозвідки противника, фізико-географічні умови в операційному районі як середовищі поширення електромагнітних хвиль будемо розглядати як блок вихідних даних для подальшого моделювання. До цих вихідних даних, крім тих, що розглянуті в аналогічному блоці математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки раціональним призначенням видів модуляції своїм засобам, слід віднести:

$\Gamma = (\mathbf{M}, \mathbf{G})$ – граф структури системи військового радіозв'язку, де \mathbf{M} – множина вершин (засобів радіозв'язку), $\mathbf{G} = (G_1, G_2, \dots, G_g)$ – множина гілок (ліній прямого зв'язку між засобами радіозв'язку);

$\lambda_{зад}$ – заданий рівень інтенсивності радіообміну;

$\tau_{зад}$ – заданий рівень часової затримки доставки інформаційних пакетів;

$\sigma_{зад}$ – заданий рівень дисперсії часової затримки доставки інформаційних пакетів;

$\rho_{зад}$ – заданий рівень імовірності своєчасної доставки інформаційних пакетів;

$\lambda_{зад}^{втрам}$ – заданий рівень інтенсивності втрат інформаційних пакетів;

ml – інформаційні напрямки в системі військового радіозв'язку ($\forall m \in [1, M], \forall l \in [1, M], \forall m \neq l$);

k_{ml} – часткові інформаційні потоки кожного інформаційного напрямку ($k \in [1, K]$);

$m_{G_1} l_{G_1}, m_{G_2} l_{G_2}, \dots, m_{G_g} l_{G_g}$ – засоби радіозв'язку, між якими є лінії прямого зв'язку (узагальнена система військового радіозв'язку);

$\varphi_{G_1}, \varphi_{G_2}, \dots, \varphi_{G_g}$ – пропускні здатності гілок структури системи військового радіозв'язку;

$j^{(G_1)}, j^{(G_2)}, \dots, j^{(G_g)}$ – раціональне призначення видів модуляції гілкам структури системи радіозв'язку;

$\Lambda_{(k_{ml})G}$ – 2-тензор інтенсивностей радіообміну на одному інформаційному напрямку (у загальному вигляді);

$\mathbf{T}_{(k_{ml})G}$ – 2-тензор часових затримок доставки інформаційних пакетів для одного інформаційного напрямку (у загальному вигляді);

$\mathbf{P}_{(k_{ml})G}$ – 2-тензор імовірностей своєчасної доставки інформаційних пакетів для одного інформаційного напрямку (у загальному вигляді);

$\Sigma_{(k_{ml})G}$ – 2-тензор дисперсій часових затримок доставки інформаційних пакетів для одного інформаційного напрямку (у загальному вигляді);

$\mathbf{RD}_{(ml)G}(\Lambda)$ – 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок системи радіозв'язку залежно від інтенсивностей інформаційного обміну (у загальному вигляді);

$\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{T})$ – 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок системи радіозв'язку залежно від часових затримок інформаційного обміну (у загальному вигляді);

$\mathbf{RD}_{(ml)G}(\Sigma)$ – 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок системи радіозв'язку залежно від дисперсій часових затримок інформаційного обміну (у загальному вигляді);

$\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{P})$ – 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок системи радіозв'язку залежно від імовірностей своєчасного інформаційного обміну (у загальному вигляді).

Базовий блок моделювання підпроцесу формування можливих маршрутів інформаційного обміну ґрунтується на відомій у дискретній математиці процедурі розкладання графа $\mathbf{\Gamma} = (\mathbf{M}, \mathbf{G})$ на множину його простих ланцюгів $\mathbf{\Xi} = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_g$ для кожного інформаційного напрямку ml .

Базовий блок моделювання підпроцесу оцінювання поточних значень коефіцієнта розвідувальної доступності можливих маршрутів радіообміну з урахуванням різних режимів роботи засобів радіозв'язку на окремих їх ділянках ґрунтується на аналітичних співвідношеннях для коефіцієнта розвідувальної доступності засобів військового радіозв'язку в різних режимах роботи, аналітичній залежності для коефіцієнта розвідувальної доступності окремої гілки структури системи радіозв'язку та тензорі $\mathbf{A}_{\Xi G}$ перетворення базису \mathbf{G} на базис $\mathbf{\Xi}$ (рисунок 1).

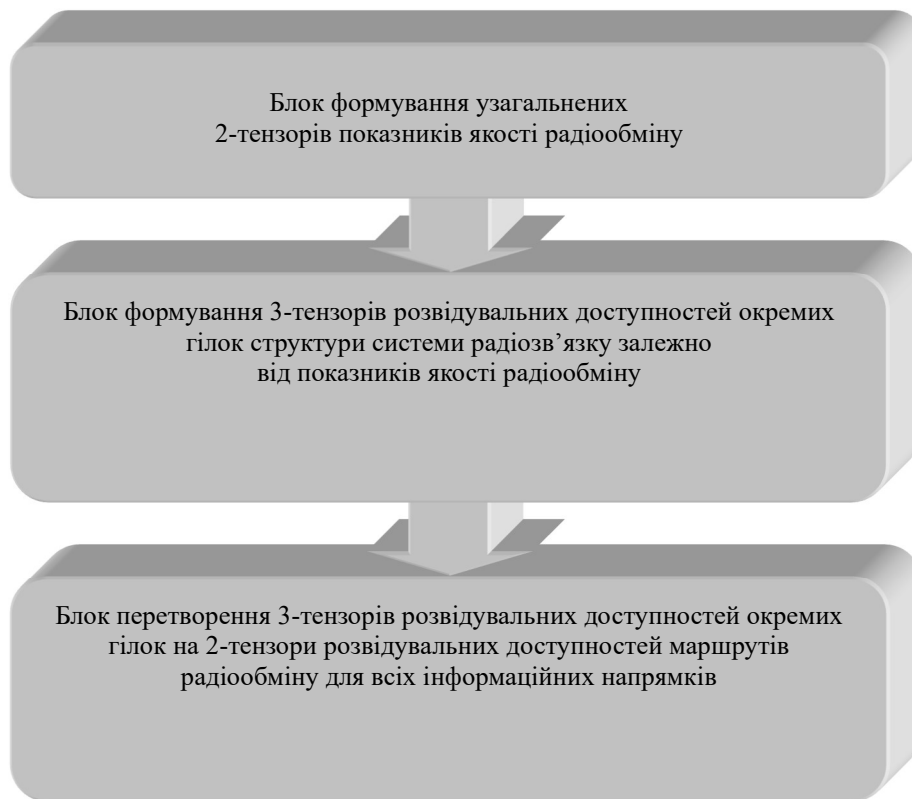


Рисунок 1 – Структура базового блока моделювання підпроцесу оцінювання поточних значень коефіцієнта розвідувальної доступності можливих маршрутів радіообміну

У блоці формування узагальнених тензорів другого рангу (2-тензорів) показників якості радіообміну здійснюється узагальнення на всі інформаційні напрямки $K_{ml}G_g$ -вимірних 2-тензорів показників якості радіообміну для одного інформаційного напрямку. Ця процедура виконується з метою забезпечення врахування всіх можливих особливостей якості радіообміну у масштабі всієї системи військового радіозв'язку під час її захисту від радіорозвідки противника та їх узагальнення. Отримання узагальнених 2-тензорів показників якості радіообміну у масштабі системи радіозв'язку дасть змогу коректно підійти до вирішення завдання визначення раціональних маршрутів радіообміну в системі шляхом пошуку компромісу між якістю радіообміну та вимогами щодо розвідувальної доступності як окремих засобів військового радіозв'язку, маршрутів радіообміну, так і системи радіозв'язку в цілому. Також це є зручним інструментом для оцінювання поточного стану спроможностей системи військового радіозв'язку щодо забезпечення якісного інформаційного обміну в системі управління військами (силами).

У блоці формування тензорів третього рангу (3-тензорів) розвідувальних доступностей окремих гілок структури системи радіозв'язку залежно від показників якості радіообміну здійснюється узагальнення 2-тензорів розвідувальних доступностей на всі режими роботи засобів радіозв'язку.

З урахуванням усіх режимів роботи засобів радіозв'язку 2-тензор розвідувальних доступностей $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\Lambda)$ набере вигляду $7G_g \sum_{m,l} K_{ml}$ -вимірний 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок структури системи радіозв'язку $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\Lambda)$ (рисунок 2).

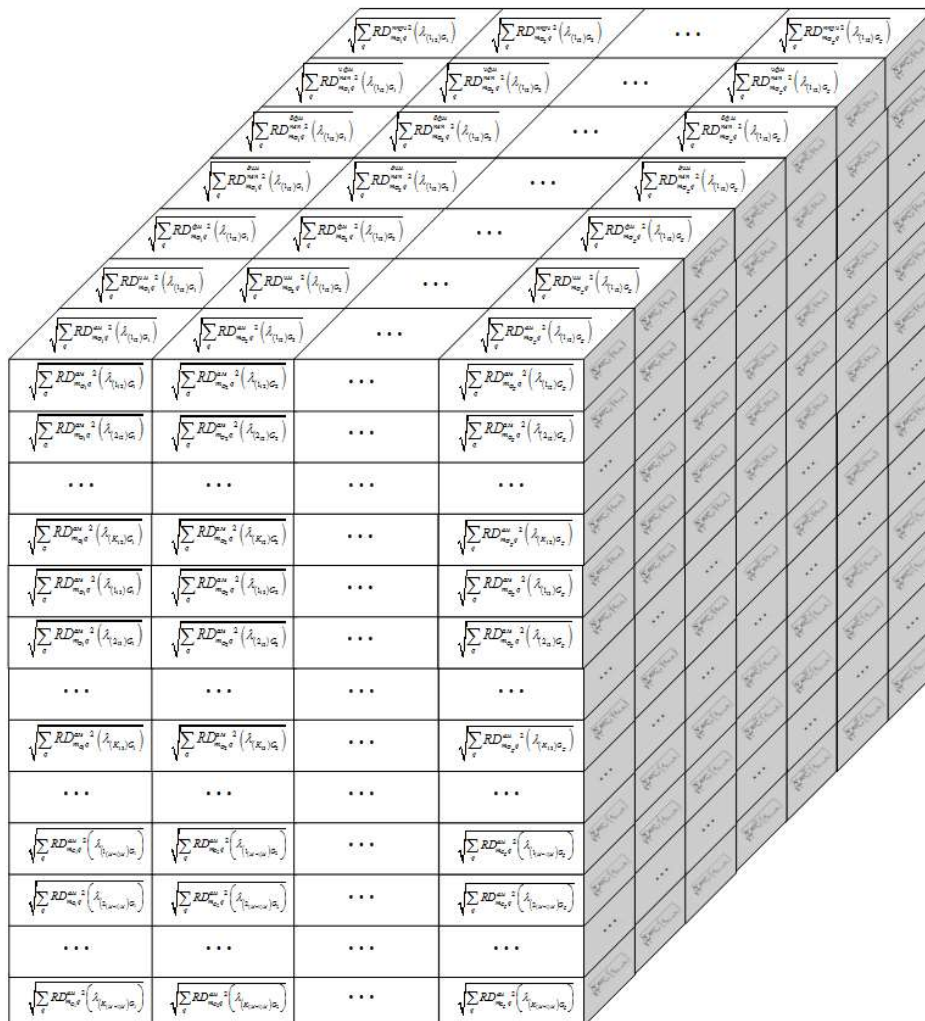


Рисунок 2 – 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\Lambda)$

З урахуванням усіх режимів роботи засобів радіозв'язку 2-тензор розвідувальних доступностей $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{T})$ трансформується у $7G_g \sum_{m,l} K_{ml}$ -вимірний 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\mathbf{T})$ (рисунок 3).

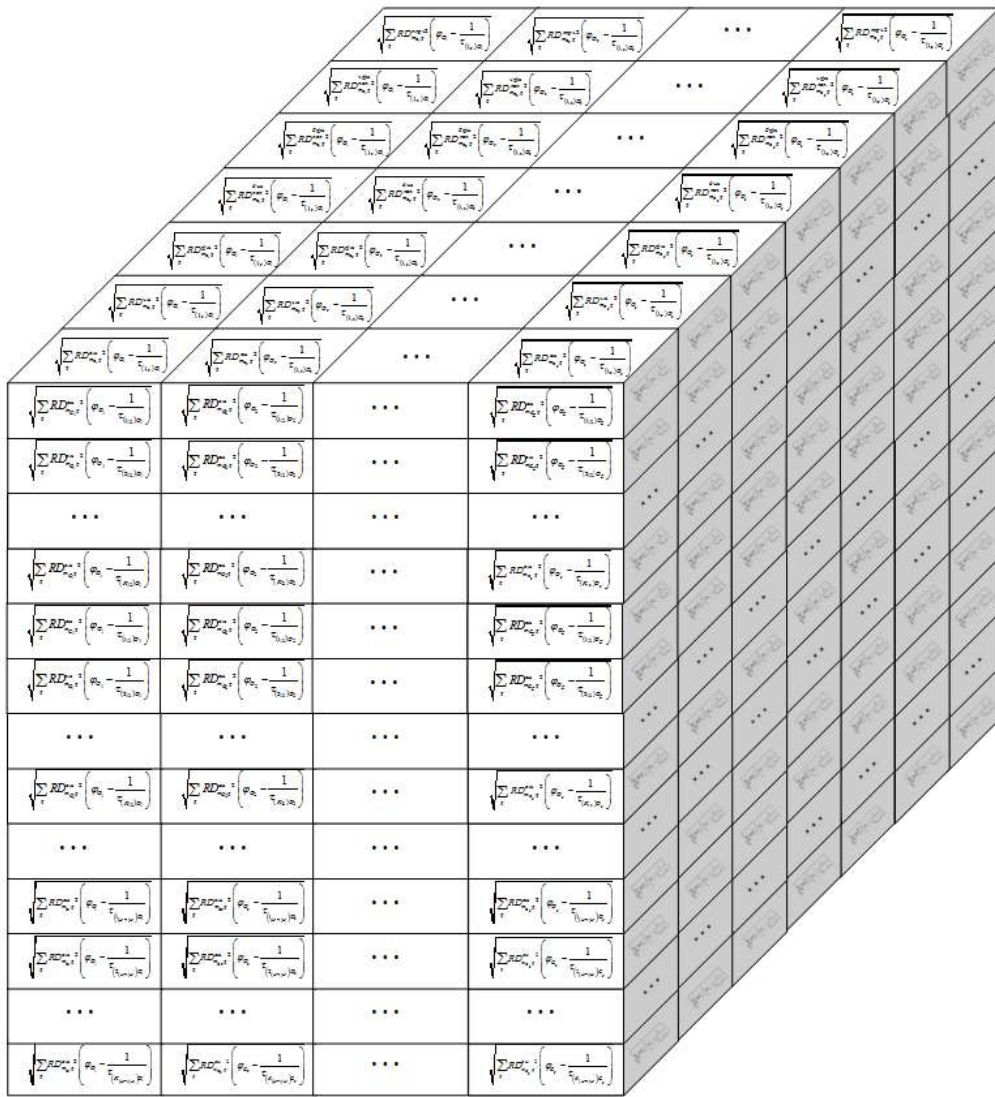


Рисунок 3 – 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\mathbf{T})$

Якщо будуть ураховані всі режими роботи засобів радіозв'язку, то 2-тензор розвідувальних доступностей $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{\Sigma})$ набере вигляду $7G_g g \sum_{m,l} K_{ml}$ -вимірною 3-тензором розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\mathbf{\Sigma})$ (рисунок 4).

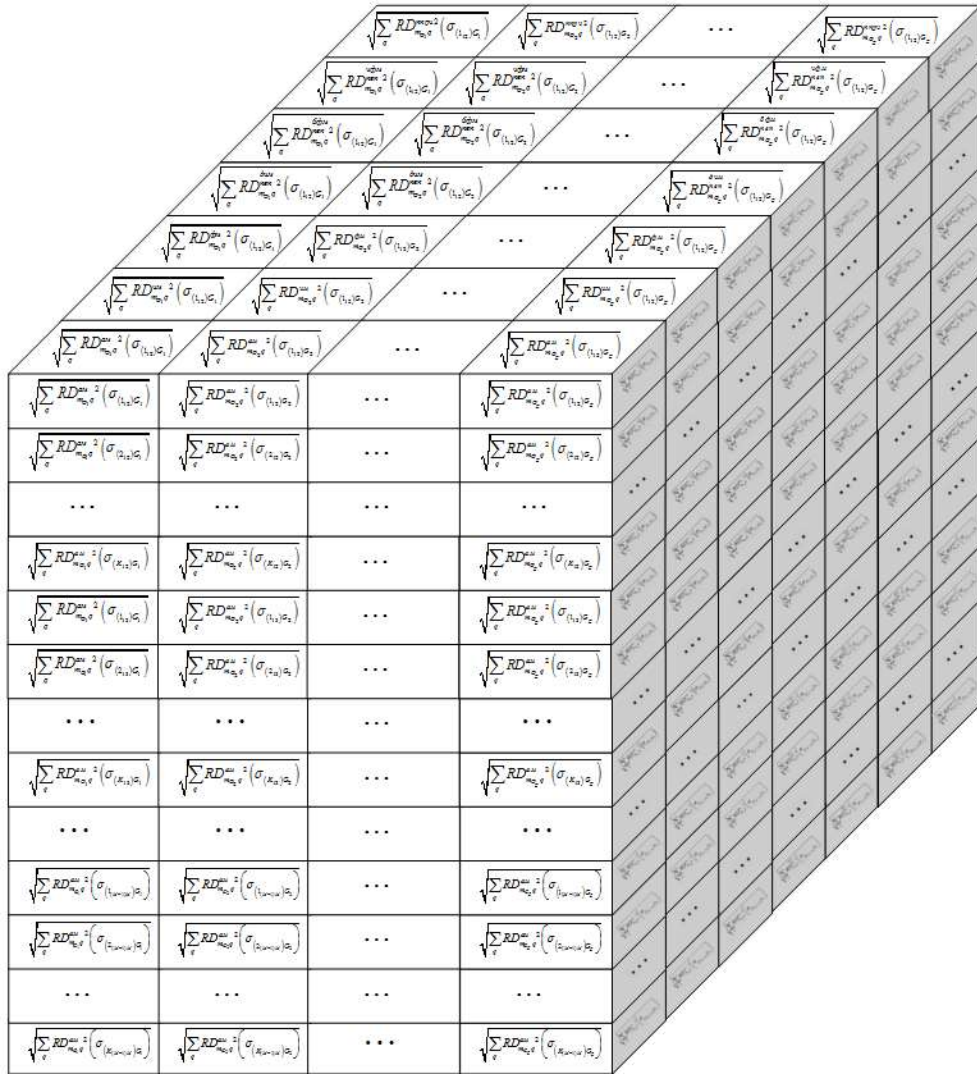


Рисунок 4 – 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\Sigma)$

У разі врахування всіх режимів роботи засобів радіозв'язку 2-тензор розвідувальних доступностей $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{P})$ трансформується у $7G_g g \sum_{m,l} K_{ml}$ -вимірний 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\mathbf{P})$ (рисунок 5).

Блок перетворення 3-тензорів розвідувальних доступностей окремих гілок на 2-тензори розвідувальних доступностей маршрутів радіообміну для всіх інформаційних напрямків ґрунтується на застосуванні тензора $\mathbf{A}_{\Xi G}$ як тензора перетворення базису \mathbf{G} на базис Ξ .

Тоді в загальному вигляді можемо записати

$$\mathbf{RD}_{(ml)\Xi} = \mathbf{RD}_{(ml)Gj} \mathbf{A}_{\Xi G}^{-1} = \mathbf{RD}_{(ml)Gj} \mathbf{A}_{G\Xi}, \quad (1)$$

де

$$\mathbf{A}_{G\Xi} = \begin{matrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ G_g \end{matrix} \left\| \begin{array}{cccc} \xi_1 & \xi_2 & \dots & \xi_g \\ a_{11} & a_{21} & \mathbf{K} & a_{g1} \\ a_{12} & a_{22} & \mathbf{K} & a_{g2} \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ a_{1g} & a_{2g} & \mathbf{K} & a_{gg} \end{array} \right\|. \quad (2)$$

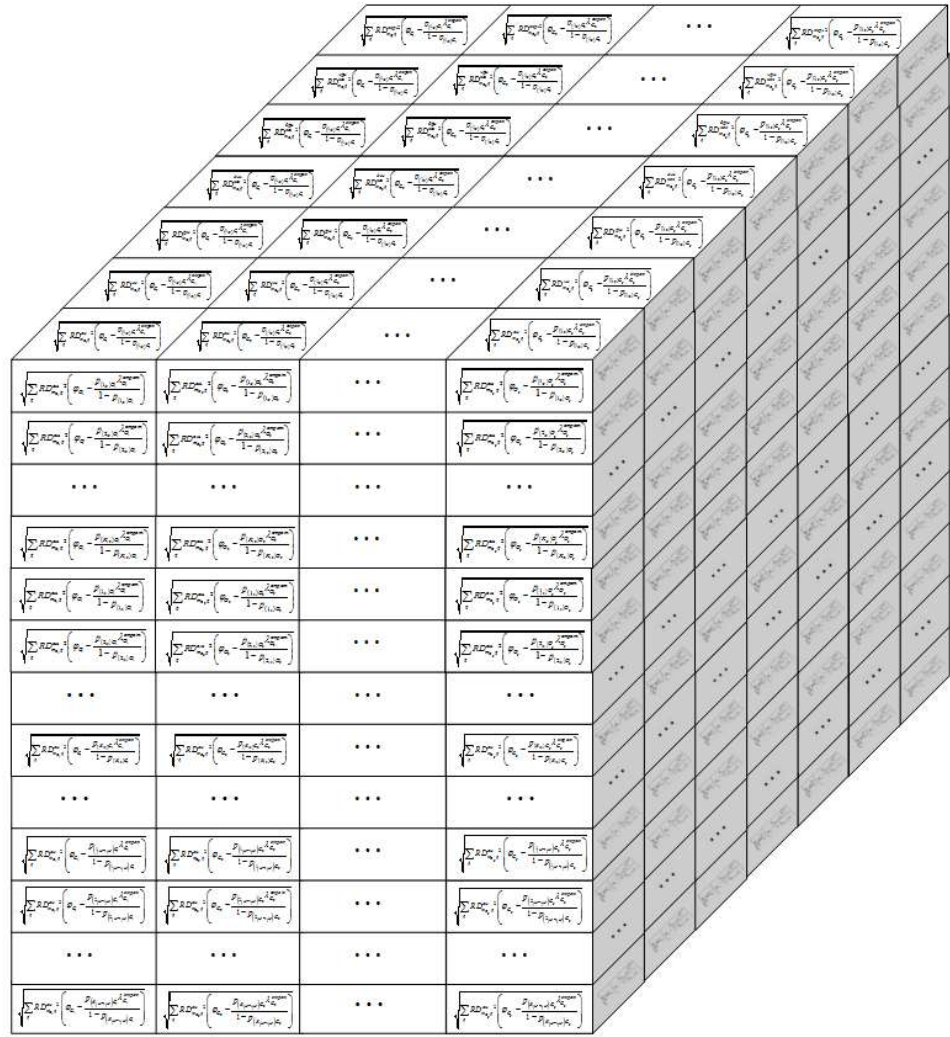


Рисунок 5 – 3-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі $\mathbf{RD}_{(ml)Gj}(\mathbf{P})$

У базовому блоці моделювання підпроцесу визначення раціональних маршрутів радіообміну серед множини можливих здійснюється розв'язання оптимізаційної задачі із цільовою функцією (3):

$$\min_{\xi_i} \sqrt{RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\lambda) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\tau) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\sigma) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(p)}, \quad (3)$$

$$\forall (m, l \in [1, M]); \forall (k \in [1, K_{ml}]); \forall (\xi_i \in [\xi_1, \xi_{g_{ml}}]),$$

при обмеженнях: $\lambda_{k_{ml}} \leq \lambda_{зад}$; $\tau_{k_{ml}} \leq \tau_{зад}$; $\sigma_{k_{ml}} \leq \sigma_{зад}$; $p_{k_{ml}} \geq p_{зад}$; $\lambda_{(k_{ml})G}^{втрат} \leq \lambda_{зад}^{втрат}$.

При цьому для кожного інформаційного напрямку в системі радіозв'язку вибираються такі раціональні маршрути передачі часткових інформаційних потоків, що мають мінімальну сумарну розвідувальну доступність при обмеженнях на інтенсивності радіообміну, середні затримки інформаційних пакетів та їх дисперсії, ймовірності своєчасної доставки інформаційних пакетів у мережі та інтенсивності втрат пакетів. Результати розв'язання оптимізаційної задачі (3) доцільно подати у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розв’язання оптимізаційної задачі (3)

Інформаційний напрямок	Частковий інформаційний потік k_{ml}	Рациональний маршрут інформаційного обміну $\xi_{рац}^{k_{ml}}$	Розрахункова розвідувальна доступність маршруту $RD_{(k_{ml})}$	Розрахункова інтенсивність інформаційного обміну на маршруті $\lambda_{(k_{ml})}$	Розрахункова затримка доставки інформації $\tau_{(k_{ml})}$	Розрахункове відхилення від середньої затримки доставки інформації $\sigma_{(k_{ml})}$	Розрахункова ймовірність своєчасної доставки інформації $p_{(k_{ml})}$
12	1 ₁₂	$\xi_{рац}^{1_{12}}$	$RD_{(1_{12})}$	$\lambda_{(1_{12})}$	$\tau_{(1_{12})}$	$\sigma_{(1_{12})}$	$p_{(1_{12})}$
	2 ₁₂	$\xi_{рац}^{2_{12}}$	$RD_{(2_{12})}$	$\lambda_{(2_{12})}$	$\tau_{(2_{12})}$	$\sigma_{(2_{12})}$	$p_{(2_{12})}$

	K_{12}	$\xi_{рац}^{K_{12}}$	$RD_{(K_{12})}$	$\lambda_{(K_{12})}$	$\tau_{(K_{12})}$	$\sigma_{(K_{12})}$	$p_{(K_{12})}$
13	1 ₁₃	$\xi_{рац}^{1_{13}}$	$RD_{(1_{13})}$	$\lambda_{(1_{13})}$	$\tau_{(1_{13})}$	$\sigma_{(1_{13})}$	$p_{(1_{13})}$
	2 ₁₃	$\xi_{рац}^{2_{13}}$	$RD_{(2_{13})}$	$\lambda_{(2_{13})}$	$\tau_{(2_{13})}$	$\sigma_{(2_{13})}$	$p_{(2_{13})}$

	K_{13}	$\xi_{рац}^{K_{13}}$	$RD_{(K_{13})}$	$\lambda_{(K_{13})}$	$\tau_{(K_{13})}$	$\sigma_{(K_{13})}$	$p_{(K_{13})}$
...	
$(M-1)M$	1 _{$(M-1)M$}	$\xi_{рац}^{1_{(M-1)M}}$	$RD_{(1_{(M-1)M})}$	$\lambda_{(1_{(M-1)M})}$	$\tau_{(1_{(M-1)M})}$	$\sigma_{(1_{(M-1)M})}$	$p_{(1_{(M-1)M})}$
	2 _{$(M-1)M$}	$\xi_{рац}^{2_{(M-1)M}}$	$RD_{(2_{(M-1)M})}$	$\lambda_{(2_{(M-1)M})}$	$\tau_{(2_{(M-1)M})}$	$\sigma_{(2_{(M-1)M})}$	$p_{(2_{(M-1)M})}$

	$K_{(M-1)M}$	$\xi_{рац}^{K_{(M-1)M}}$	$RD_{(K_{(M-1)M})}$	$\lambda_{(K_{(M-1)M})}$	$\tau_{(K_{(M-1)M})}$	$\sigma_{(K_{(M-1)M})}$	$p_{(K_{(M-1)M})}$

Блок-схему математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв’язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю подано на рисунку 6. На блок-схемі під номером 1 позначено базовий блок отримання й аналізу інформації про поточний стан засобів радіозв’язку, системи радіорозвідки противника, фізико-географічні умови в операційному районі, як середовищі поширення електромагнітних хвиль; під номерами 2–5 позначені складники базового блока моделювання підпроцесу формування можливих маршрутів радіообміну шляхом розкладання графа $\Gamma = (\mathbf{M}, \mathbf{G})$ на множину його простих ланцюгів $\Xi = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_g$ для кожного інформаційного напрямку ml ; під номерами 6–9 подано блоки формування тензора перетворення базису \mathbf{G} на базис Ξ ; під номерами 10–13 позначені складники блока формування узагальнених на всі інформаційні напрямки системи радіозв’язку 2-тензорів показників якості радіообміну; під номерами 14–17 позначені складники блока формування 3-тензорів розвідувальних доступностей окремих гілок структури системи радіозв’язку залежно від показників якості тензорів розвідувальних доступностей окремих гілок у 2-тензори розвідувальних доступностей маршрутів радіообміну для всіх інформаційних напрямків; під номером 22 подано базовий блок моделювання підпроцесу визначення раціональних маршрутів радіообміну серед множини можливих; під номером 23 подано блок формування раціональних маршрутів радіообміну з низькою розвідувальною доступністю.

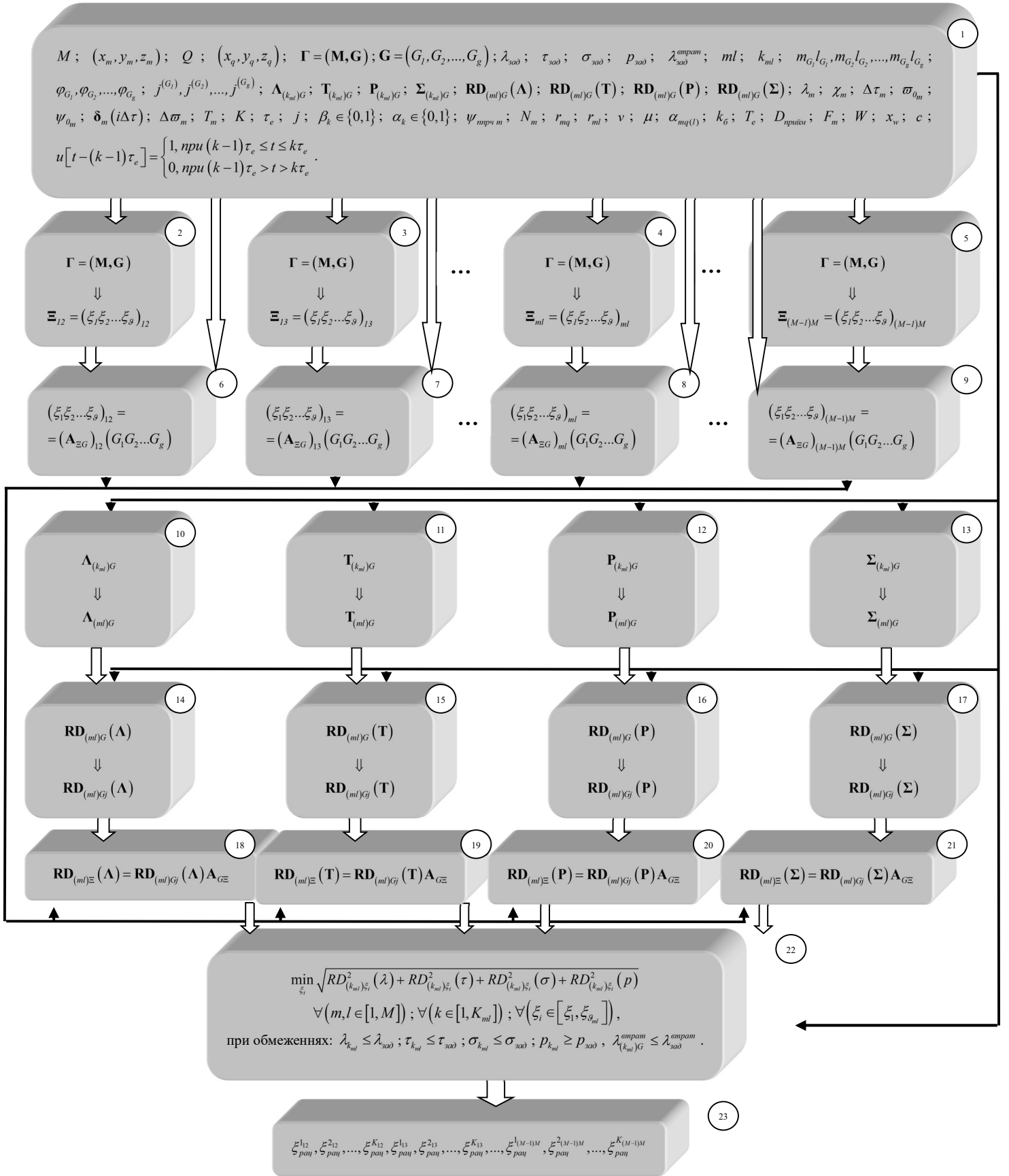


Рисунок 6 – Блок-схема математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами

Висновки

У статті розроблено математичну модель функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку. Її наукова новизна полягає у такому.

1. Модель уперше враховує процес захисту автоматизованої системи військового радіозв'язку від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю.

2. Модель побудована на основі тензорних залежностей коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого радіозв'язку від показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі структури автоматизованої системи військового радіозв'язку з подальшим їх перетворенням на тензорні залежності коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів радіообміну. Це забезпечило розрахування багатопляхової маршрутизації пакетів, яка реалізується в сучасній і перспективній автоматизованих системах військового радіозв'язку не лише з міркувань оптимального використання ресурсів системи військового радіозв'язку, а і з міркувань пошуку компромісу між значеннями коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів радіообміну та значеннями показників його якості. Крім того, це забезпечило отримання раціональних маршрутів радіообміну в автоматизованій системі військового радіозв'язку.

Одержані результати є науковим підґрунтям подальшого розвитку системного підходу до розроблення теоретичних і практичних засад створення математичних моделей процесів функціонування автоматизованих систем військового радіозв'язку в умовах їхнього захисту від радіорозвідки. Отже, мету статті можна вважати досягнутою.

Надалі у дослідженнях планується вдосконалювання алгоритмів формування 3-тензорів розвідувальних доступностей окремих гілок структури системи радіозв'язку залежно від показників якості радіообміну.

Перелік джерел посилання

1. Azzouz E. E., Nandi A. K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. New York, US : Springer, 1996. 218 p.

2. Andrew C. Codebreaking and Signals Intelligence. Oxfordshire, UK : Routledge and CRC Press, 1986. 148 p.

3. Luo F. Machine Learning for Future Wireless Communications. New Jersey, US : Wiley-IEEE Press, 2019. 463 p.

4. Doherty E. P. EForensics and Signal Intelligence for Everyone. Norwich, UK : Bertrams Print On Demand, 2006.

5. Mixed-mode ic design techniques for spectrum sharing. Dissertation by JIAN SHAO. Submitted to the Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. URL: <http://surl.li/uopsl> (accessed: 25.04.2024).

6. Организация и ведение радиоразведки / под ред. В. Ф. Шмагченко и Д. М. Кузьмина. Л.: ВАС, 1980. в 2 т.

7. Quality of Service: Regulation Manual. URL: https://www.itu.int/pub/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017 (accessed: 29.04.2024).

8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : підручник. 4-е вид. 1969. 576 с. URL: <http://surl.li/ulcis> (дата звернення: 25.04.2024).

9. Волобуєв А. П., Свида І. Ю., Бухал Д. А. Метод математичного моделювання функціонування системи радіозв'язку (метод мультитензора). *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. Київ, 2018. № 72. С. 32–41.

10. Schade, Heinz and Neemann, Klaus. Tensor Analysis, Berlin, Boston: De Gruyter, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110404265>.

11. Fast and Structured Block-Term Tensor Decomposition For Hyperspectral Unmixing. January 2023. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing PP(99):1-19. January 2023. PP(99):1-19. DOI: 10.48550/arXiv.2303.01770/.

12. Лемешко О. В. Теоретичні основи управління мережними ресурсами з використанням тензорних математичних моделей телекомунікаційних систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.12.02. Харків, 2005. 35 с.

13. Ponomarev D. U. Tensors analysis for investigation next generation network. URL: <http://surl.li/uoprf> (accessed: 10.04.2024).

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 р.

UDC [623.611:621.396]:519.876.5

M. Yakovlev, A. Volobuiev, Yu. Pribyliev

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE FUNCTIONING OF AN
AUTOMATED MILITARY RADIO COMMUNICATION SYSTEM IN THE PROCESS OF ITS
PROTECTION AGAINST RADIO RECONNAISSANCE BY RADIO EXCHANGE
BY RATIONAL ROUTES**

The article presents the general provisions and essence of the approach to building a mathematical model of the functioning of an automated military radio communication system in the process of its protection against radio reconnaissance by radio exchange along rational routes. The main components of the mathematical model of the functioning of an automated military radio communication system in the process of its protection against radio reconnaissance by radio exchange along rational routes with low intelligence availability are considered. The general structure of a mathematical model of the functioning of an automated military radio communication system in the process of its protection against radio reconnaissance by radio exchange along rational routes is proposed. It is shown that in the basic modeling unit of the subprocess of determining the rational routes of radio exchange among the set of possible ones, an optimization problem is solved. The result of solving this optimization problem is presented in tabular form for convenience. The analytical expressions for the third morning tensor (3-tensor) of the reconnaissance accessibility of individual branches of the radio communication system structure are obtained.

Keywords: *model, mathematical modeling, automated systems, military radio communications, information exchange routes, intelligence availability factor, training material and technical base, troop training, training base, training complex, artificial intelligence, functioning algorithms, protection against radio reconnaissance.*

Волобуєв Анатолій Петрович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України

<https://orcid.org/0000-0001-9415-0736>

Яковлев Максим Юрійович – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

<https://orcid.org/0000-0002-3009-0719>

Прібілєв Юрій Борисович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційної боротьби Національного університету оборони України

<https://orcid.org/0000-0003-1941-3561>