

УДК [623.611:621.396]:519.876.5



М. Ю. Яковлев



А. П. Волобуєв



Ю. Б. Прібилєв

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ ЇХ ЗАХИСТУ ВІД РАДІОРОЗВІДКИ

У статті розкрито основні теоретичні положення та сутність підходу до моделювання процесів функціонування автоматизованих систем військового радіозв'язку в умовах їх захисту від радіорозвідки. Наведено узагальнену систему військового радіозв'язку та подання складного базису структури системи радіозв'язку для інформаційного напрямку. Подано спосіб отримання тензора перетворення елементарного базису структури системи радіозв'язку в складний. Розглянуто тензори показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі структури системи радіозв'язку. Отримано тензорні залежності коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого радіозв'язку від показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі. Описано основні складові математичної моделі функціонування автоматизованої системи військового радіозв'язку в процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю.

*К л ю ч о в і с л о в а:* 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.** В сучасних умовах повномасштабної російсько-української війни процеси набуття нових спроможностей сучасними (і перспективними) засобами радіозв'язку та засобами радіорозвідки призводять до суттєвих змін у функціонуванні систем військового радіозв'язку (СВР) під час їх захисту від радіорозвідки. Важливою складовою цього питання є математичне моделювання функціонування СВР у процесі їх захисту від радіорозвідки.

Існуюча методологія математичного моделювання функціонування СВР у процесі їх захисту від радіорозвідки певною мірою не відповідає потребам, які необхідні для проведення досліджень функціонування сучасних та перспективних автоматизованих систем військового радіозв'язку (АСВР) у процесі їх захисту від сучасних та перспективних засобів радіорозвідки насамперед через відсутність математичних моделей, які б відповідали перспективним варіантам функціонування АСВР в процесі її захисту від радіорозвідки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання створення та удосконалення складових методології математичного моделювання функціонування СВР в процесі їх захисту від радіорозвідки були розглянуті у низці наукових праць таких вчених як-от: Палій А. І., Сіфоровий В. І, Ізюмов Н. М., Варганєсян В. А., Цветнов В. В., Демін В. П., Купріянов А. І., Макаренко С. І., Канєвський З. М., Літвіненко В. П., Макаров Г. В. та ін. Ними розроблено математичні моделі функціонування засобів та СВР в процесі їх захисту від радіорозвідки з урахуванням понад двох десятків різноманітних показників рівня їх радіомаскування [1–8]. Запропоновані математичні моделі мають переважно ймовірнісний характер, тому перевірка їх адекватності передбачає наявність великого обсягу статистичного матеріалу, що не завжди можливо. Крім того, застосування даних 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.

Існуючі моделі побудовані, виходячи із спроможностей засобів радіозв'язку та засобів радіорозвідки старого парку, і базуються на застосуванні такої енергетичної характеристики, як співвідношення сигнал/шум, нехтуючи процесом прийняття рішень щодо наявності корисних сигналів на виходах приймачів засобів радіорозвідки противника та засобів радіозв'язку своєї системи.

Отже, можна стверджувати, що існуюча методологія математичного моделювання функціонування СВР в процесі їх захисту від радіорозвідки не має потрібних складових, які враховують спроможності сучасних та перспективних засобів радіозв'язку, засобів радіорозвідки і процес прийняття рішень щодо наявності корисних сигналів на виходах їх приймачів, що і обумовлює її подальший розвиток.

**Мета статті** – розкрити зміст підходу до моделювання процесів функціонування АСВР в умовах їх захисту від радіорозвідки та навести приклад його реалізації.

#### **Виклад основного матеріалу.**

**1. Основні теоретичні положення та сутність підходу до моделювання процесів функціонування АСВР в умовах їх захисту від радіорозвідки.** Для варіанта функціонування АСВР в процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю знадобиться модель функціонування, що дасть змогу отримувати такі раціональні маршрути. Їх раціональність обумовлюватиметься мінімальним значенням їх розвідувальної доступності з дотриманням обмежень на значення показників якості інформаційного обміну в СВР. Отже, потрібні математичні вирази для коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів інформаційного обміну в СВР, що залежатимуть від показників якості інформаційного обміну. Перелік таких показників визначається Міжнародним союзом електрозв'язку [9].

До базових показників можна віднести: інтенсивність інформаційного обміну, затримку доставки інформаційних пакетів, імовірність своєчасної доставки інформаційних пакетів та дисперсію затримки доставки інформаційних пакетів.

У процесі функціонування АСВР, яка застосовує раціональні маршрути інформаційного обміну з низькою розвідувальною доступністю, можна виділити підпроцеси, що зазначені на рисунку 1.

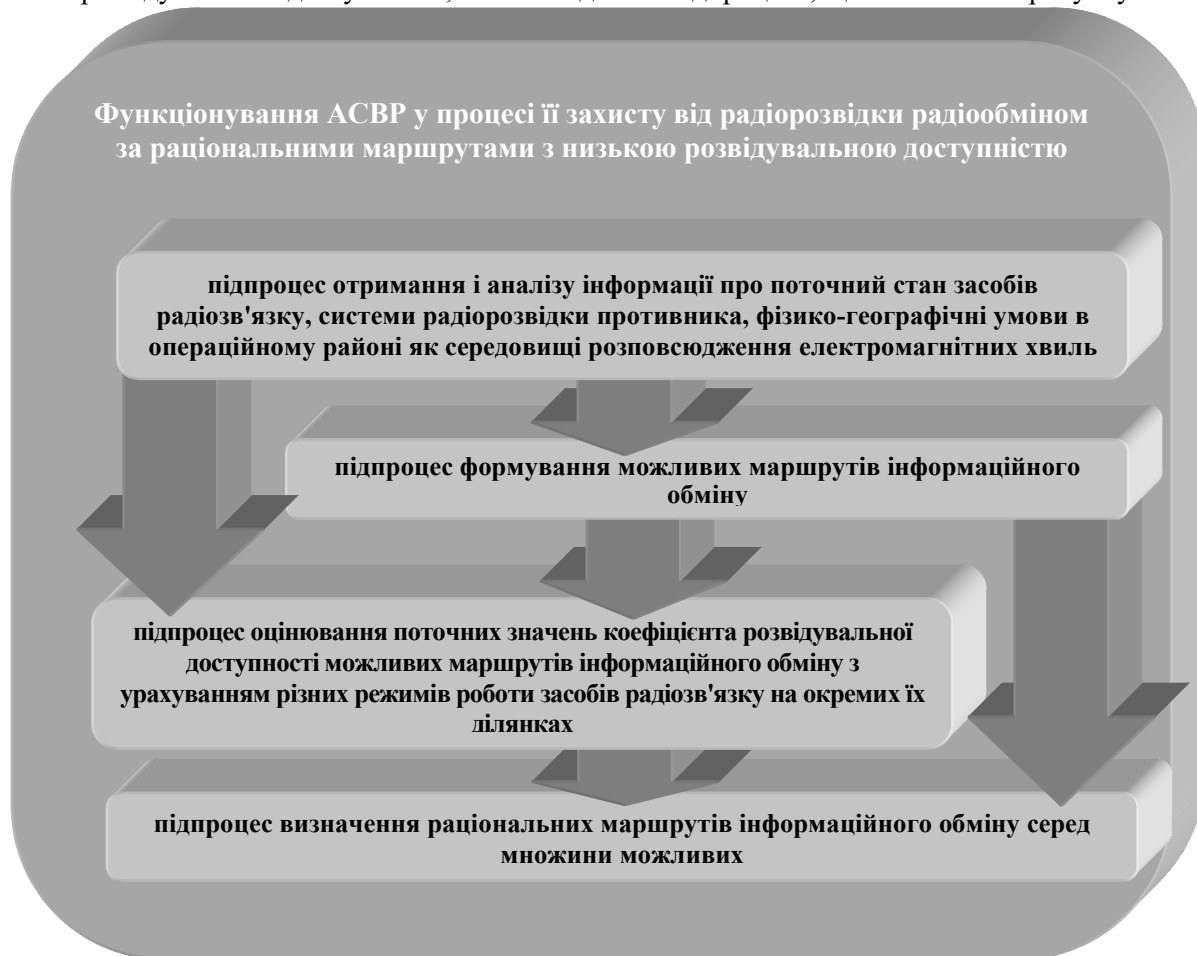


Рисунок 1 – Взаємозв'язок підпроцесів функціонування АСВР у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю

Крім того, слід враховувати, що через кожен засіб радіозв'язку можуть передаватися не лише його власні інформаційні потоки, а й потоки, що ретранслюються ним від інших засобів своєї системи радіозв'язку. Це обумовлює використання під час моделювання поняття інформаційного напрямку, який пов'язує два будь-яких засоби радіозв'язку множиною можливих маршрутів інформаційного обміну і поняття часткових інформаційних потоків на напрямку, які в сукупності утворюють загальний інформаційний потік інформаційного напрямку.

Підпроцес отримання і аналізу інформації можна також вважати формуванням вихідних даних для подальшого моделювання. Підпроцес формування можливих маршрутів інформаційного обміну полягатиме у формуванні для кожного інформаційного напрямку множини простих ланцюгів [10] структури системи військового радіозв'язку. Математичні вирази коефіцієнтів розвідувальної доступності можливих маршрутів інформаційного обміну мають базуватися на математичних виразах коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих засобів радіозв'язку, підхід до отримання яких запропоновано у статті [11]. Загальна логіка моделювання має відображати перехід від коефіцієнтів розвідувальної доступності засобів радіозв'язку до коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого зв'язку і до коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів інформаційного обміну (рис. 2).

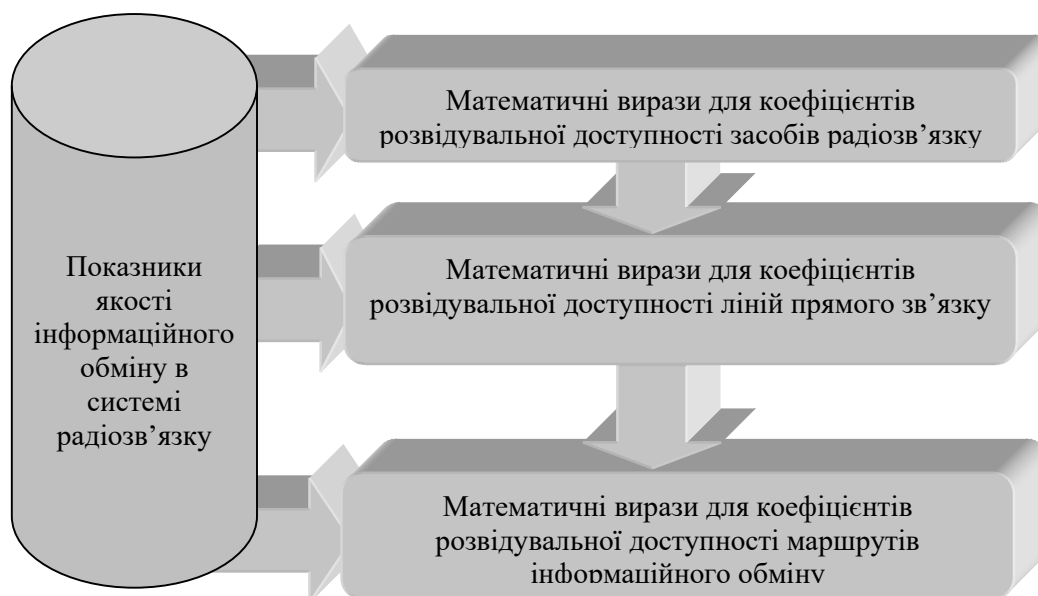


Рисунок 2 – Логіка отримання математичних виразів коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів інформаційного обміну в системі військового радіозв'язку

Дотриманню цієї логіки цілком відповідає підхід Габрієля Крона до моделювання електричних машин, запропонований ним у «Тензорному аналізі мереж» [12]. Г. Крон запропонував поняття узагальненої машини, яка є множиною відокремлених найпростіших її елементів різних типів. Якщо казати мовою геометрії, то узагальнена машина утворює деякий гіпотетичний дискретний анізотропний простір. До того ж ці найпростіші елементи є просторами різної кількості вимірів. Поєднання найпростіших елементів у той чи інший спосіб розглядалося Г. Кроном як формування нових просторів-структур, з якими пов'язувалися різноманітні системи координат або базиси. Головною ідеєю було те, що зміна конструкції електричної машини є не чим іншим, як перетворенням її координат у різноманітних координатних системах.

Одним з основоположників геометричної інтерпретації задач, пов'язаних із системами зв'язку, є засновник загальної теорії зв'язку О. О. Харкевич, який запропонував геометричні моделі сигналу, завади, каналу зв'язку, системи зв'язку, сформулював та довів на мові геометрії теорему про пропускну спроможність тощо [13]. Широко застосовував геометричні підходи і засновник теорії потенційної завадостійкості В. О. Котельников.

Адаптацією ідей Г. Крона до інформаційних та телекомунікаційних систем займалися В. В. Поповський [14], О. В. Лемешко [15], І. В. Стрелковська [16], А. Е. Петров [17], Т. І. Григор'єва [18], О. А. Дробот [19] та ін. Але їх праці жодним чином не пов'язані з проблематикою розвідувальної доступності засобів та систем радіозв'язку. Згідно з підходом Г. Крона, щоб отримати математичний вираз коефіцієнта розвідувальної доступності ліній прямого зв'язку, необхідно в найпростішому варіанті розв'язати одновимірну задачу. Якщо ж взяти множину ліній прямого зв'язку і синтезувати на їх основі

радіомережу, то узагальнимо одновимірну задачу до багатовимірної, розмірність якої визначатиметься кількістю ліній прямого зв'язку. Тобто систему військового радіозв'язку будемо розглядати як пару: структура та процес інформаційного обміну в ній, і застосуємо поняття узагальненої системи військового радіозв'язку як множини окремих ліній прямого зв'язку. З цією узагальненою системою військового радіозв'язку пов'яжемо поняття елементарного базису, осями якого будуть окремі гілки структури системи.

Поєднуючи в різноманітний спосіб лінії прямого зв'язку, отримуватимемо різні варіанти структур системи військового радіозв'язку, з кожним із яких пов'язується множина складних базисів, осями яких є маршрути інформаційного обміну.

Отже, задачу отримання математичних виразів коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів інформаційного обміну в СВР можна звести до геометричної задачі перетворення координат з елементарного базису до складного, скориставшись тензором перетворення елементарного базису до складного. Моделювання підпроцесу оцінювання поточних значень коефіцієнта розвідувальної доступності можливих маршрутів інформаційного обміну з урахуванням різних режимів роботи засобів радіозв'язку на окремих їх ділянках можна подати таким чином (рис. 3).



Рисунок 3 – Підхід до моделювання підпроцесу оцінювання поточних значень коефіцієнта розвідувальної доступності можливих маршрутів інформаційного обміну з урахуванням різних режимів роботи засобів радіозв'язку на окремих їх ділянках

Підпроцес визначення раціональних маршрутів інформаційного обміну серед множини можливих полягатиме у розв'язанні оптимізаційної задачі з цільовою функцією значень коефіцієнтів розвідувальної доступності можливих маршрутів інформаційного обміну з урахуванням різних режимів роботи засобів радіозв'язку на окремих їх ділянках, яку слід мінімізувати, за обмежень, що накладені на значення показників якості інформаційного обміну, а саме: інтенсивність інформаційного обміну має не перевищувати пропускну спроможність СВР, затримка доставки інформаційних пакетів та дисперсія затримки доставки інформаційних пакетів мають не перевищувати заданого значення, а ймовірність своєчасної доставки інформаційних пакетів має бути не нижче заданого значення.

**2. Узагальнена СВР. Елементарний та складний базиси структури.** Під час моделювання функціонування СВР зручно подати її структуру у вигляді графа  $\Gamma = (M, G)$  (наприклад, як на рис. 4), де  $M$  – множина вершин (множина засобів радіозв'язку),  $G = (G_i)$  – множина гілок (множина ліній прямого зв'язку між засобами радіозв'язку).

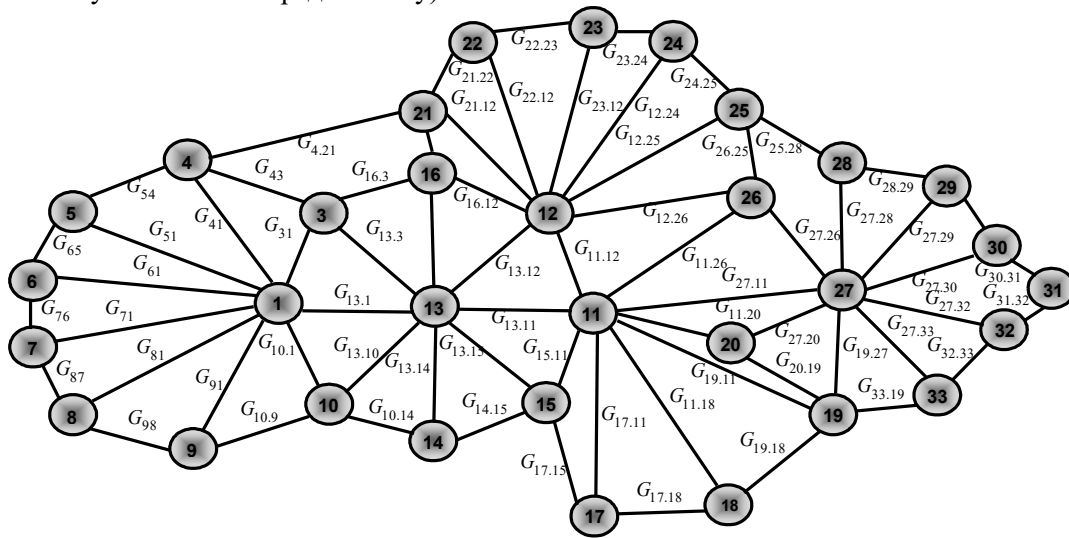


Рисунок 4 – Приклад графа структури системи радіозв'язку

Скориставшись згаданим вище підходом тензорного аналізу мереж Габрієля Крона, з графа  $\Gamma = (M, G)$  можна отримати так звану узагальнену СВР, якщо його розкласти на сукупність не пов'язаних одна з одною ліній прямого зв'язку  $G_i$ , і прийняти її за елементарний базис  $G = G_1 G_2 \dots G_g$  на структурі системи (наприклад, як на рис. 5).

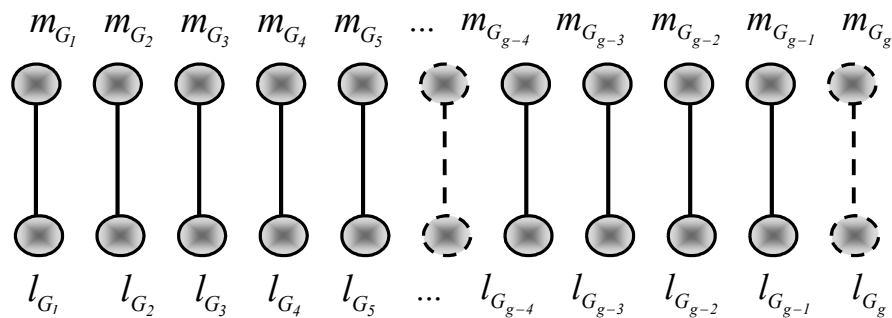


Рисунок 5 – Приклад узагальненої системи радіозв'язку

Якщо для кожного інформаційного напрямку граф  $\Gamma = (M, G)$  розкласти на множину його простих ланцюгів  $\Xi = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_g$  (тобто на множину можливих маршрутів інформаційного обміну), то цю множину можна розглядати як складний базис на структурі системи (наприклад, як на рис. 6).

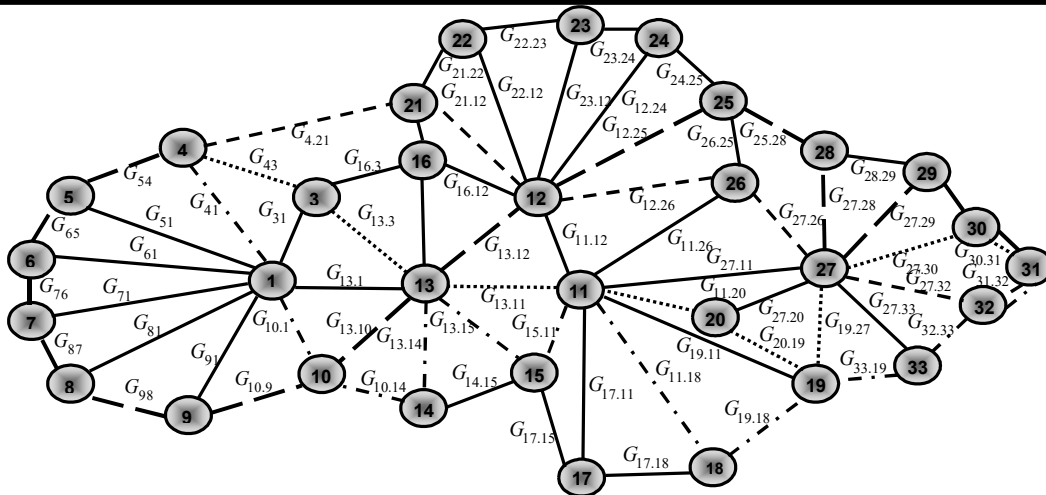


Рисунок 6 – Приклад елемента складного базису структури системи радіозв'язку для інформаційного напрямку

**2.1 Тензор перетворення елементарного базису структури системи радіозв'язку в складний.** Маючи два базиси, елементарний і складний, можна отримати тензор  $\mathbf{A}_{\Xi G}$  перетворення базису  $\mathbf{G}$  у базис  $\Xi$ , а саме:

$$\xi_1 \xi_2 \dots \xi_g = \mathbf{A}_{\Xi G} (G_1 G_2 \dots G_g). \quad (1)$$

Якщо розкласти базис  $\Xi$  у базисі  $\mathbf{G}$ , то вираз (1) матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= a_{11} G_1 + a_{12} G_2 + \dots + a_{1g} G_g \\ \xi_2 &= a_{21} G_1 + a_{22} G_2 + \dots + a_{2g} G_g \\ &\quad \vdots \\ \xi_g &= a_{g1} G_1 + a_{g2} G_2 + \dots + a_{gg} G_g \end{aligned} \quad (2)$$

Звідси отримаємо загальний вигляд тензора перетворення базисів:

$$\mathbf{A}_{\Xi G} = \begin{matrix} & G_1 & G_2 & \dots & G_g \\ \begin{matrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_g \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1g} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{g1} & a_{g2} & \dots & a_{gg} \end{matrix} \right\| \end{matrix}. \quad (3)$$

**2.2 Тензори показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі структури системи радіозв'язку.** Враховуючи множину часткових інформаційних потоків  $1_{ml}, 2_{ml}, \dots, K_{ml}$ , що можуть передаватися на одному інформаційному напрямку  $ml$ , показник інтенсивності інформаційного обміну для цього напрямку буде мати вигляд  $K_{ml} G_g$ -вимірному тензора другого рангу (2-тензора) інтенсивностей часткових інформаційних потоків, який може бути поданий так:

$$\Lambda_{(K_{ml})G} = \begin{matrix} & G_1 & G_2 & \dots & G_g \\ \begin{matrix} 1_{ml} \\ 2_{ml} \\ \vdots \\ K_{ml} \end{matrix} & \left\| \begin{matrix} \lambda_{(1_{ml})G_1} & \lambda_{(1_{ml})G_2} & \dots & \lambda_{(1_{ml})G_g} \\ \lambda_{(2_{ml})G_1} & \lambda_{(2_{ml})G_2} & \dots & \lambda_{(2_{ml})G_g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{(K_{ml})G_1} & \lambda_{(K_{ml})G_2} & \dots & \lambda_{(K_{ml})G_g} \end{matrix} \right\| \end{matrix}, \quad (4)$$

де  $\lambda_{(1_{ml})G_1}$  – інтенсивність часткового  $1_{ml}$  інформаційного потоку на інформаційному напрямку  $ml$  у гілці  $G_1$  структури системи радіозв'язку.

Показник часових затримок доставки інформаційних потоків для одного інформаційного напрямку  $ml$  може бути поданий  $K_{ml}G_g$ -вимірним 2-тензором часових затримок такого виду:

$$\mathbf{T}_{(k_{ml})G} = \begin{matrix} & G_1 & G_2 & K & G_g \\ \begin{matrix} 1_{ml} \\ 2_{ml} \\ K \\ K_{ml} \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccc} \tau_{(1_{ml})G_1} & \tau_{(1_{ml})G_2} & K & \tau_{(1_{ml})G_g} \\ \tau_{(2_{ml})G_1} & \tau_{(2_{ml})G_2} & K & \tau_{(2_{ml})G_g} \\ K & K & K & K \\ \tau_{(K_{ml})G_1} & \tau_{(K_{ml})G_2} & K & \tau_{(K_{ml})G_g} \end{array} \right\| & \end{matrix}, \quad (5)$$

де  $\tau_{(1_{ml})G_1}$  – часова затримка доставки часткового  $1_{ml}$  інформаційного потоку на інформаційному напрямку  $ml$  у гілці  $G_1$  структури системи радіозв'язку.

Тоді показник своєчасної доставки інформаційних потоків для одного інформаційного напрямку  $ml$  можна записати як  $K_{ml}G_g$ -вимірний 2-тензор імовірностей такого виду:

$$\mathbf{P}_{(k_{ml})G} = \begin{matrix} & G_1 & G_2 & K & G_g \\ \begin{matrix} 1_{ml} \\ 2_{ml} \\ K \\ K_{ml} \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccc} P_{(1_{ml})G_1} & P_{(1_{ml})G_2} & K & P_{(1_{ml})G_g} \\ P_{(2_{ml})G_1} & P_{(2_{ml})G_2} & K & P_{(2_{ml})G_g} \\ K & K & K & K \\ P_{(K_{ml})G_1} & P_{(K_{ml})G_2} & K & P_{(K_{ml})G_g} \end{array} \right\| & \end{matrix}, \quad (6)$$

де  $P_{(1_{ml})G_1}$  – ймовірність своєчасної доставки часткового  $1_{ml}$  інформаційного потоку на інформаційному напрямку  $ml$  у гілці  $G_1$  структури системи радіозв'язку.

Тепер можна перейти до іншого показника, а саме до дисперсії часових затримок доставки інформаційних пакетів. Знов таки розглядатимемо один інформаційний напрямок структури СВР. Отже, дисперсії часових затримок доставки інформаційних потоків для одного інформаційного напрямку  $ml$  також можна об'єднати у  $K_{ml}G_g$ -вимірний 2-тензор дисперсій такого виду:

$$\mathbf{\Sigma}_{(k_{ml})G} = \begin{matrix} & G_1 & G_2 & K & G_g \\ \begin{matrix} 1_{ml} \\ 2_{ml} \\ K \\ K_{ml} \end{matrix} & \left\| \begin{array}{cccc} \sigma_{(1_{ml})G_1} & \sigma_{(1_{ml})G_2} & K & \sigma_{(1_{ml})G_g} \\ \sigma_{(2_{ml})G_1} & \sigma_{(2_{ml})G_2} & K & \sigma_{(2_{ml})G_g} \\ K & K & K & K \\ \sigma_{(K_{ml})G_1} & \sigma_{(K_{ml})G_2} & K & \sigma_{(K_{ml})G_g} \end{array} \right\| & \end{matrix}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{(1_{ml})G_1}$  – дисперсія середньої часової затримки доставки часткового  $1_{ml}$  інформаційного потоку на інформаційному напрямку  $ml$  у гілці  $G_1$  структури системи радіозв'язку.

**2.3 Тензорні залежності коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого радіозв'язку від показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі.** В загальному вигляді залежність розвідувальної доступності будь-якої окремої гілки структури системи

радіозв'язку від інтенсивності інформаційного обміну в ній можна оцінити за допомогою такого співвідношення:

$$RD_G(\lambda) = \sqrt{\sum_q RD_{mq}^2(\lambda)}, \quad (8)$$

де  $m$  – засіб радіозв'язку гілки, який передає інформацію.

Узагальнюючи вираз (8) на всю систему радіозв'язку та враховуючи лише один режим роботи засобів радіозв'язку, наприклад, амплітудну модуляцію (АМ), і вираз (4), ця залежність матиме вигляд  $(M \times (M-1)) \times G_g$ -вимірною 2-тензора розвідувальних доступностей окремих гілок системи радіозв'язку  $RD_{(ml)G}(\Lambda)$ :

$$\begin{array}{cccc} G_1 & G_2 & K & G_g \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{12})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{12})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{12})G_g})} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{12})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{12})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{12})G_g})} \\ K & K & K & K \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{12})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{12})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{12})G_g})} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{13})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{13})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{13})G_g})} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{13})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{13})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{13})G_g})} \\ K & K & K & K \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{13})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{13})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{13})G_g})} \\ K & K & K & K \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{(M-1)M})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{(M-1)M})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(1_{(M-1)M})G_g})} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{(M-1)M})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{(M-1)M})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(2_{(M-1)M})G_g})} \\ K & K & K & K \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{(M-1)M})G_1})} & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{(M-1)M})G_2})} & K & \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am\ 2}(\lambda_{(K_{(M-1)M})G_g})} \end{array} \quad (9)$$

Отримати аналітичну залежність між розвідувальними доступностями гілок структури СВР та часовими затримками доставки інформаційних потоків у них можливо за такою логікою.

Припустимо, що інформаційні потоки в гілках СВР обслуговуються за моделлю М/М/1. Тоді затримку доставки часткового інформаційного потоку  $1_{ml}$  у гілці  $G_1$  на інформаційному напрямку  $ml$  структури мережі можна подати так [20]:

$$\tau_{(1_{ml})G_1} = \frac{1}{\varphi_{G_1} - \lambda_{(1_{ml})G_1}}. \quad (10)$$



Звідси легко бачити, що:

$$\lambda_{(1_m)G_1} = \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(1_m)G_1}}. \quad (11)$$

Отже, виходячи з виразу (11),  $(M_g(M-1))g_g$  -вимірний 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі  $RD_{(m)G}(\mathbf{T})$  для режиму роботи АМ з урахуванням виразу (5) матиме такий вигляд:

|  |  |     |  |      |
|--|--|-----|--|------|
| $G_1$  | $G_2$  | $K$ | $G_g$  |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(1_2)G_1}} \right)}$        | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(1_2)G_2}} \right)}$        | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(1_2)G_g}} \right)}$        | (12) |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(2_2)G_1}} \right)}$        | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(2_2)G_2}} \right)}$        | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(2_2)G_g}} \right)}$        |      |
| $K$  | $K$  | $K$ | $K$  |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(K_{12})G_1}} \right)}$     | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(K_{12})G_2}} \right)}$     | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(K_{12})G_g}} \right)}$     |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(1_3)G_1}} \right)}$        | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(1_3)G_2}} \right)}$        | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(1_3)G_g}} \right)}$        |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(2_3)G_1}} \right)}$        | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(2_3)G_2}} \right)}$        | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(2_3)G_g}} \right)}$        |      |
| $K$  | $K$  | $K$ | $K$  |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(K_{13})G_1}} \right)}$     | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(K_{13})G_2}} \right)}$     | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(K_{13})G_g}} \right)}$     |      |
| $K$  | $K$  | $K$ | $K$  |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(1_{(M-1)M})G_1}} \right)}$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(1_{(M-1)M})G_2}} \right)}$ | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(1_{(M-1)M})G_g}} \right)}$ |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(2_{(M-1)M})G_1}} \right)}$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(2_{(M-1)M})G_2}} \right)}$ | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(2_{(M-1)M})G_g}} \right)}$ |      |
| $K$  | $K$  | $K$ | $K$  |      |
| $\sqrt{\sum_q RD_{mG_1q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_1} - \frac{1}{\tau_{(K_{(M-1)M})G_1}} \right)}$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_2q}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_2} - \frac{1}{\tau_{(K_{(M-1)M})G_2}} \right)}$ | $K$ | $\sqrt{\sum_q RD_{mG_gq}^{am\ 2} \left( \varphi_{G_g} - \frac{1}{\tau_{(K_{(M-1)M})G_g}} \right)}$ |      |

Отримання аналітичної залежності між розвідувальними доступностями гілок структури мережі та дисперсіями часових затримок доставки інформаційних потоків у них передбачає реалізацію таких етапів.

Дисперсію часової затримки часткового інформаційного потоку  $1_{ml}$  у гілці  $G_1$  на інформаційному напрямку  $ml$  структури мережі можна подати так [20]:

$$\sigma_{(1_{ml})G_1} = \frac{1}{\left(\varphi_{G_1} - \lambda_{(1_{ml})G_1}\right)^2}. \quad (13)$$

Звідси отримуємо:

$$\lambda_{(1_{ml})G_1} = \varphi_{G_1} + \sqrt{\varphi_{G_1}^4 - \varphi_{G_1}^2 + \frac{1}{\sigma_{(1_{ml})G_1}}}. \quad (14)$$

Скориставшись виразом (14) і з урахуванням виразу (7),  $(M_g(M-1))gG_g$ -вимірний 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі  $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\Sigma)$  для режиму роботи АМ матиме такий вигляд:

$$\left( \begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{12})G_1}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{12})G_1}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{12})G_1}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{13})G_1}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{13})G_1}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{13})G_1}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{(M-1)M})G_1}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{(M-1)M})G_1}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{(M-1)M})G_1}\right)} \end{array} & \begin{array}{c} \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{12})G_2}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{12})G_2}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{12})G_2}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{13})G_2}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{13})G_2}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{13})G_2}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{(M-1)M})G_2}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{(M-1)M})G_2}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{(M-1)M})G_2}\right)} \end{array} & \begin{array}{c} \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \end{array} \begin{array}{c} \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{12})G_g}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{12})G_g}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{12})G_g}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{13})G_g}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{13})G_g}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{13})G_g}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(1_{(M-1)M})G_g}\right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(2_{(M-1)M})G_g}\right)} \\ \mathbf{K} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am}{}^2 \left(\sigma_{(K_{(M-1)M})G_g}\right)} \end{array} \end{array} \right). \quad (15)$$

Аналitiчну залежність між розвідувальними доступностями гілок структури мережі та ймовірностями своєчасної доставки інформаційних потоків у них можна отримати шляхом реалізації таких викладок.

Ймовірність своєчасної доставки часткового інформаційного потоку  $1_{ml}$  на інформаційному напрямку  $ml$  в одній гілці  $G_1$  структури мережі [21]:

$$P_{(1_{ml})G_1} = \frac{\varphi_{G_1} - \lambda_{(1_{ml})G_1}}{\varphi_{G_1} - \lambda_{(1_{ml})G_1} + \lambda_{G_1}^{empam}}, \quad (16)$$

де  $\lambda_{G_1}^{empam}$  – інтенсивність втрат пакетів у гілці  $G_1$  структури мережі.

Звідси можна показати, що:

$$\lambda_{(1_{ml})G_1} = \varphi_{G_1} - \frac{P_{(1_{ml})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(1_{ml})G_1}}. \quad (17)$$

Також, скориставшись виразом (17), урахувуючи вираз (6),  $(M \times (M-1)) \times G_g$ -вимірний 2-тензор розвідувальних доступностей окремих гілок мережі  $\mathbf{RD}_{(ml)G}(\mathbf{P})$  для режиму роботи АМ матиме такий вигляд:

$$\left\| \begin{array}{ccc} \begin{array}{c} G_1 \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(1_{12})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(1_{12})G_1}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(2_{12})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(2_{12})G_1}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(K_{12})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(K_{12})G_1}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(1_{13})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(1_{13})G_1}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(2_{13})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(2_{13})G_1}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_1}q}^{am} \left( \varphi_{G_1} - \frac{P_{(K_{13})G_1} \lambda_{G_1}^{empam}}{1 - P_{(K_{13})G_1}} \right)} \\ \text{К} \end{array} & \begin{array}{c} G_2 \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(1_{12})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(1_{12})G_2}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(2_{12})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(2_{12})G_2}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(K_{12})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(K_{12})G_2}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(1_{13})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(1_{13})G_2}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(2_{13})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(2_{13})G_2}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_2}q}^{am} \left( \varphi_{G_2} - \frac{P_{(K_{13})G_2} \lambda_{G_2}^{empam}}{1 - P_{(K_{13})G_2}} \right)} \\ \text{К} \end{array} & \begin{array}{c} G_g \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(1_{12})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(1_{12})G_g}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(2_{12})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(2_{12})G_g}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(K_{12})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(K_{12})G_g}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(1_{13})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(1_{13})G_g}} \right)} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(2_{13})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(2_{13})G_g}} \right)} \\ \text{К} \\ \sqrt{\sum_q RD_{m_{G_g}q}^{am} \left( \varphi_{G_g} - \frac{P_{(K_{13})G_g} \lambda_{G_g}^{empam}}{1 - P_{(K_{13})G_g}} \right)} \\ \text{К} \end{array} \end{array} \right\| \quad (18)$$

Перейти до тензорних залежностей коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів інформаційного обміну від показників його якості у складному базисі структури СВР можна, скориставшись тензором перетворення елементарного базису структури системи радіозв'язку в складний (3), узагальнивши наведені 2-тензори (9), (12), (15), (18) на всі режими роботи засобів радіозв'язку, що розглядаються.

**3 Основні складові математичної моделі функціонування АСВР у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю.** Згідно із загальними положеннями теоретичних основ методології математичного моделювання функціонування АСВР у процесі її захисту від радіорозвідки (відповідно до рис. 1), математична модель функціонування АСВР у процесі її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю має чотири базові блоки: блок отримання та аналізу інформації про поточний стан засобів радіозв'язку, системи радіорозвідки противника, фізико-географічні умови в операційному районі як середовищі розповсюдження 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 та аналізу інформації про поточний стан засобів радіозв'язку, системи радіорозвідки противника, фізико-географічні умови в операційному районі як середовищі розповсюдження електромагнітних хвиль розглядається як блок вихідних даних для подальшого моделювання.

Базовий блок моделювання підпроцесу формування можливих маршрутів інформаційного обміну ґрунтується на відомій у дискретній математиці процедурі розкладання графа  $\Gamma = (\mathbf{M}, \mathbf{G})$  на множини його простих ланцюгів  $\Xi = \xi_1 \xi_2 \dots \xi_g$  для кожного інформаційного напрямку  $ml$ , де  $\Gamma = (\mathbf{M}, \mathbf{G})$  – граф структури системи військового радіозв'язку;  $\mathbf{M}$  – множина вершин (засобів радіозв'язку);  $\mathbf{G} = (G_1, G_2, \dots, G_g)$  – множина гілок (ліній прямого зв'язку між засобами радіозв'язку).

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 (8) та тензорі  $\mathbf{A}_{\Xi G}$  перетворення базису  $\mathbf{G}$  у базис  $\Xi$  (2), (3).

У базовому блоці моделювання підпроцесу визначення раціональних маршрутів радіообміну серед множини можливих здійснюється розв'язання оптимізаційної задачі з цільовою функцією

$$\min_{\xi_i} \sqrt{RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\lambda) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\tau) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(\sigma) + RD_{(k_{ml})\xi_i}^2(p)}, \quad (19)$$

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

за обмежень  $\lambda_{k_{ml}} \leq \lambda_{зад}; \tau_{k_{ml}} \leq \tau_{зад}; \sigma_{k_{ml}} \leq \sigma_{зад}; p_{k_{ml}} \geq p_{зад}, \lambda_{(k_{ml})G}^{втрат} \leq \lambda_{зад}^{втрат}$ .

При цьому для кожного інформаційного напрямку в системі радіозв'язку обираються такі раціональні маршрути передачі часткових інформаційних потоків, що мають мінімальну сумарну розвідувальну доступність за обмежень на інтенсивності радіообміну, середні затримки інформаційних пакетів та їх дисперсії, ймовірності своєчасної доставки інформаційних пакетів у мережі та інтенсивності втрат пакетів.

### Висновки

У статті запропоновано алгоритм визначення раціональних маршрутів радіообміну з низькою розвідувальною доступністю в АСВР, який є основою для розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації і враховує, крім відомих обмежень щодо забезпечення допустимої середньої затримки інформаційного потоку на маршруті, необхідної ймовірності своєчасної доставки інформаційного потоку, допустимого відхилення від середньої затримки інформаційного потоку, ще й обмеження щодо допустимої розвідувальної доступності маршрутів проходження інформаційних потоків, що є суттєвим для військового радіозв'язку.

Алгоритм побудовано, використовуючи базові елементи теоретичних основ методології математичного моделювання функціонування АСВР у процесі її захисту від радіорозвідки, зокрема з опорою на такі поняття та їх математичне подання, як «елементарний та складний базиси структури системи військового радіозв'язку»; «тензор перетворення елементарного базису структури системи військового радіозв'язку в складний»; «тензорні залежності коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого радіозв'язку від показників якості інформаційного обміну в елементарному та складному базисі».

Розроблено математичну модель функціонування АСВР, яка вперше: враховує процес її захисту від радіорозвідки радіообміном за раціональними маршрутами з низькою розвідувальною доступністю; побудована на основі тензорних залежностей коефіцієнтів розвідувальної доступності окремих ліній прямого радіозв'язку від показників якості інформаційного обміну в елементарному базисі структури АСВР з подальшим їх перетворенням до тензорних залежностей коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів радіообміну. Це забезпечило вираховування багатошляхової маршрутизації пакетів, яка реалізується у сучасній та перспективній АСВР, не лише з міркувань оптимального використання ресурсів СВР, а й пошуку компромісу між значеннями коефіцієнтів розвідувальної доступності маршрутів радіообміну та значеннями показників його якості. Крім того, це також забезпечило отримання раціональних маршрутів радіообміну в АСВР. Запропоновані теоретичні положення можуть бути використані під час створення тренажерних комплексів (тренажерної бази) на основі штучного інтелекту з метою підвищення ефективності підготовки військ.

Одержані результати є науковою основою для подальшого розвитку системного підходу до розроблення теоретичних та практичних засад моделювання процесів функціонування АСВР в умовах їх захисту від радіорозвідки, отже мету статті можна вважати досягнутою.

У подальших дослідженнях планується удосконалити алгоритми формування тензорів третього рангу (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. 224 p.
5. Вартанесян В. А. Радіоелектронна розвідка. URL:<http://surl.li/ulfrs> (дата звернення: 01.03. 2024).
6. Макаренко С. І., Іванов М. С., Попов С. А. Перешкодзахист систем зв'язку з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти: монографія. URL:<http://surl.li/ulfmz> (дата звернення: 03.03.2024).
7. Цветнов В. В., Дьомін В. П., Купріянов А. І. Радіоелектронна боротьба: радіомаскування та перешкодзахист. URL:<http://surl.li/ulfeq> (дата звернення: 03.03.2024).
8. Палій А. І. Радіоелектронна боротьба. URL:<http://surl.li/ulfaa> (дата звернення: 10.03.2024).
9. Quality of Service: Regulation Manual. URL: [https://www.itu.int/pub/D-PREF-BB.QOS\\_REG01-2017](https://www.itu.int/pub/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017) (дата звернення: 29.01.2023).
10. Новіков Ф. А. Дискретна математика для програмістів. URL:<http://surl.li/ulhfd> (дата звернення: 10.03.2024).
11. 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.
12. Крон Г. Тензорний аналіз мереж. URL:<http://surl.li/ulewc> (дата звернення: 14.03.2024).
13. Харкевич А. А. Нариси загальної теорії зв'язку. URL:<http://surl.li/ulesa> (дата звернення: 15.03.2024).
14. Поповський В. В., Лемешко А. В. Тензорний аналіз в задачах системного дослідження телекомунікаційних систем. *Радіотехніка*. 2002. Вип. 125. С. 156–164.

15. 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.

16. Стрелковська І. В., Соколовська І. Н. Використання тензорного методу при розрахунку телекомунікаційної системи, представленою вузловою мережею. *Проблеми телекомунікацій*. 2010. № 1 (1). С. 68 – 75.

17. Тензорний метод подвійних мереж. URL:[http://files/monographs/Petrov\\_Tenzorny\\_method.pdf](http://files/monographs/Petrov_Tenzorny_method.pdf) (дата звернення: 12.03.2024).

18. Григор'єва Т. І. Застосування властивості інваріантності тензора при математичному моделюванні телекомунікаційних систем. *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. 2005. № 2. С. 49–53.

19. Лемешко А. В., Дробот О. А. Модель многопутевой QoS-маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі. *Радіотехніка*. Харків, 2006. Вип. 144. С. 16–22.

20. Вентцель Е. С. Теорія імовірностей. 4-е вид. URL: <http://surl.li/ulcis> (дата звернення: 16.03.2024).

21. Арипов М. Н. Проектування та технічна експлуатація мереж передачі дискретних повідомлень. URL:<http://surl.li/mbtwa> (дата звернення: 12.03.2024).

*Стаття надійшла до редакції 10.04.2024 р.*

**UDC [623.611:621.396]:519.876.5**

**M. Yakovlev, A. Volobuev, Yu. Pribyliev**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF FUNCTIONING OF AUTOMATED MILITARY RADIO COMMUNICATION SYSTEMS IN TERMS OF THEIR PROTECTION AGAINST RADIO RECONNAISSANCE**

*The article reveals the basic theoretical provisions and the essence of the approach to modeling the processes of functioning of automated military radio communication systems in terms of their protection against radio reconnaissance. An algorithm for determining rational radio exchange routes with low intelligence availability in an automated military radio communication system is proposed, which is the basis for solving the problem of multi-path routing and takes into account, in addition to the known limitations, the restrictions on the permissible intelligence availability of information flow routes, which is essential for military radio communication. A mathematical model of the functioning of an automated military radio communication system has been developed, which for the first time: takes into account the process of its protection against radio reconnaissance by radio exchange along rational routes with low intelligence availability; is based on the tensor dependencies of the coefficients of intelligence availability of individual direct radio communication lines on the quality indicators of information exchange in the elementary basis of the structure of the automated military radio communication system with their subsequent transformation to tensor dependencies of the coefficients. The proposed theoretical positions can be used in the creation of training complexes (training base) based on artificial intelligence in order to increase the efficiency of troop training.*

*Key words: 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.*

**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>

**Волобуєв Анатолій Петрович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України.

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

**Прібилєв Юрій Борисович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційної боротьби Національного університету оборони України.

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