

УДК. 614.8

РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПИСУ ТА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ГАРНІЗОНУ ДСНС

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-11

Шевченко С. М.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-6740-9252

Луцик В. В.¹, ORCID iD 0009-0003-1310-2444

Ковальов О. О.², ORCID iD 0000-0002-4974-5201

Гапоненко Ю. І.¹, ORCID iD 0000-0003-0854-5710

Змага М. І.¹, ORCID iD 0000-0003-3601-292X

*E-mail: shevchenko_serhii@nuczu.edu.ua

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²ГУ ДСНС України у Харківській області, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

10.02.2026

Прийнято: 13.04.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

гарнізон, ДСНС, ефективність, моделювання, оперативна готовність, пожежно-рятувальні підрозділи, стохастична модель, управління ресурсами.

АНОТАЦІЯ

У статті розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо підвищення ефективності управління ресурсами пожежно-рятувальних підрозділів гарнізону Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації розподілу сил і засобів в умовах високої інтенсивності викликів та обмеженості ресурсного забезпечення. Об'єктом дослідження є процеси функціонування гарнізону як складної динамічної системи, що піддається впливу випадкових чинників. У роботі застосовано системно-кібернетичний підхід, у межах якого стан системи визначається динамічною взаємодією чотирьох ключових груп ресурсів: вхідних подій, особового складу, технічних засобів та матеріальних засобів. Наукова новизна дослідження полягає у розробці комплексної стохастичної математичної моделі, де функціонування підрозділів представлено у вигляді векторного випадкового процесу із залежними компонентами. Запропоновано формалізований опис поведінки одиниць ресурсів через графи переходів між імовірнісними станами. На відміну від існуючих підходів, у моделі визначено функції інтенсивності потоків переходів, які динамічно залежать від середніх значень станів інших груп ресурсів, що дозволяє врахувати ефект транзитивної взаємодії в системі. Застосування квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень) дозволило перейти від стохастичного опису до систем диференціальних рівнянь, що описують еволюцію ресурсних показників у часі. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці алгоритму розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності, які виступають інтегральними показниками ефективності управління. Сформовано співвідношення початкових умов для чисельного інтегрування виведених систем рівнянь, що дає змогу прогнозувати рівень готовності гарнізону за різних сценаріїв навантаження. Результати моделювання створюють науково-методичне підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо раціонального використання сил і засобів.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку пожежно-рятувальної служби України характеризується зростанням ролі управління у забезпеченні високих показників оперативної готовності підрозділів Державної служби України з

надзвичайних ситуацій (ДСНС), їх організаційної та технічної доскональності. Умови воєнного стану та зростання кількості й масштабів негативного впливу техногенного, природного, терористичного та військового характеру створюють

додаткові загрози стабільному соціально-економічному розвитку держави та підвищують вимоги до ефективності управління ресурсами гарнізонів ДСНС. Одним із ключових завдань сучасного управління є обґрунтований вибір оптимальних рішень з урахуванням обмежених фінансових і матеріальних ресурсів, необхідності забезпечення постійної оперативної готовності сил і засобів, а також досягнення стратегічних цілей цивільного захисту. Проте в існуючій практиці управління відсутні ефективні засоби для об'єктивної оцінки результативності прийнятих управлінських рішень щодо матеріально-технічного забезпечення підрозділів ДСНС від якого залежить оперативна готовність.

Наявні підходи не забезпечують комплексного використання науково-методичних інструментів та автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, що ускладнює оперативну обробку значних обсягів інформації та підвищує ризик помилок управління в умовах динамічної обстановки. Це зумовлює необхідність розроблення та впровадження науково-обґрунтованих методів і моделей управління ресурсами гарнізонів ДСНС, які б забезпечили підвищення ефективності діяльності територіальних та функціональних підсистем служби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових праць показав, що проблематика управління ресурсами систем екстреного реагування залишається актуальною як в Україні, так і за кордоном. Зарубіжні дослідження останніх років демонструють зростання інтересу до математичного, стохастичного та імітаційного моделювання систем екстреного реагування. Так, Zhang, Liu та Peng [1] запропонували метод симуляційної оптимізації для управління ресурсами у стохастичних системах, що поєднує моделювання й оптимізаційні алгоритми – підхід, близький до використаного в даній роботі. Ingolfsson, Erkut і Budge [2] розробили імітаційну модель

функціонування служби реагування м. Едмонтон, засновану на чергових моделях із випадковим надходженням викликів, що дозволяє оцінити оперативність реагування залежно від дислокації сил.

Gross та ін. [3] запропонували класичну формалізацію теорії масового обслуговування (ТМО), яка використовується як аналітична основа для побудови систем диференціальних рівнянь у моделях ресурсного управління. Minas, Simpson і Greenwood [4] виконали узагальнюючий аналіз моделей реагування, довівши, що найвищу точність у прогнозуванні ефективності демонструють математичні моделі з випадковими параметрами, що узгоджується з квазідетермінованим підходом, застосованим у цій статті.

Серед українських досліджень переважають роботи, присвячені організаційно-технічним аспектам забезпечення діяльності підрозділів ДСНС, статистичному аналізу оперативних показників та оптимізації територіального розміщення пожежно-рятувальних частин. Зокрема, у роботі Новожилової та Михайловської [5] запропоновано організаційно-технічний метод формування ресурсного забезпечення реагування на надзвичайні ситуації, а Климаць та співавтори [6] проаналізували залежність часу прибуття підрозділів від статистичних параметрів пожеж. Кустов, Федоряка та Корнієнко [7] розглянули ефективність територіального розміщення сил, проте ці підходи не враховують динаміку змін стану ресурсів у часі, що обмежує їх застосування для комплексного моделювання.

Окремо заслуговує уваги робота Runefors, Johansson та van Hees [8], у якій запропоновано цілісний підхід до розподілу ресурсів пожежних служб на основі пріоритетів безпеки, що підтверджує актуальність дослідження ефективності управління ресурсами.

Окремої уваги заслуговують результати [9], де сформовано методичний фундамент застосування методів дослідження операцій у поточному

управлінні ресурсами екстрених служб. Утім, поза увагою автора залишилися питання моделювання внутрішньої динаміки взаємозалежних ресурсних груп.

У сучасних дослідженнях [10] наголошується на необхідності створення інтелектуальних систем підтримки рішень, які здатні працювати в умовах неповної та невизначеної інформації про надзвичайні ситуації.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності управління ресурсами пожежно-рятувальних підрозділів гарнізону ДСНС шляхом розробки комплексної стохастичної моделі та методики оцінки рівня їх оперативної готовності. Мета передбачає вирішення таких цілей: розробити комплексну стохастичну модель процесу управління ресурсами гарнізону у вигляді векторного випадкового процесу із залежними компонентами для формалізованого опису динаміки ресурсів; обґрунтувати та вивести системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку середніх значень станів усіх видів ресурсів на основі квазідетермінованого підходу; розробити методику оцінки ефективності управління ресурсами, що базується на трьохетапному алгоритмі розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності сил і засобів; сформулювати співвідношення початкових умов для кожного виду ресурсів, що забезпечить можливість практичного чисельного інтегрування розроблених систем рівнянь.

Методи дослідження. Для опису та аналізу динаміки ресурсного забезпечення пожежно-рятувальних підрозділів застосовано комплексний системно-кібернетичний підхід, що базується на стохастичному моделюванні функціонування гарнізону як складної динамічної системи.

Стан системи моделюється за допомогою векторного випадкового процесу $X(t)$ із залежними компонентами, де кожна група ресурсів (події, особовий склад, техніка, матеріальні засоби) представлена через відповідні імовірнісні

стани. Взаємодія між компонентами формалізується за допомогою функцій інтенсивності переходів, які залежать від середніх значень станів суміжних груп ресурсів, що дозволяє врахувати ефект транзитивної залежності в умовах виконання завдань за призначенням. Перехід від імовірнісного опису окремих елементів до аналізу поведінки системи в цілому реалізовано шляхом застосування квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень). Це дозволило отримати замкнені системи диференціальних рівнянь, що описують еволюцію середніх показників ресурсів у часі. Для знаходження кількісних характеристик оперативної готовності використано методи чисельного інтегрування виведених систем рівнянь із введенням специфічних початкових умов, що визначають граничні обсяги наявних сил і засобів гарнізону.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС може бути побудована на основі концепції рівнянь станів, що є ключовим підходом. Якщо ми знаємо поточний стан системи (змінні стану) та вхідні сигнали, то можливо спрогнозувати її майбутню поведінку. При цьому не потрібно знати, яким чином система потрапила в цей стан, тобто, історія процесу не є обов'язковою. Якщо описати це іншими словами, то для прогнозування змін системи достатньо лише мінімальної інформації про її поточний стан [11].

Стан ресурсів гарнізону можна зобразити як вектор-стовпець, до складу якого входять змінні стани $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. Вихідні величини - значення показників ефективності функціонування ресурсів гарнізону ДСНС, що позначаються через y_1, y_2, \dots, y_p і складають вектор $y = (y_1, y_2, \dots, y_p)^T$.

На кожен систему впливають два типи вхідних показників: керовані та некеровані. Керовані показники формують вектори $u = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$, при цьому при вирішенні завдання управління ресурсами вони розглядаються як значення кількісного складу сил та засобів гарнізону.

Некеровані вхідні показники, хоча й не піддаються прямому управлінню, також впливають на систему. Ці показники відображають зовнішні фактори, що визначаються впливом навколишнього середовища, наприклад, частота виникнення надзвичайних ситуацій (НС), пожеж, тощо, а також тимчасові характеристики оперативної діяльності підрозділів ДСНС. Усі дані показники в загальному вигляді позначаються вектором $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$.

Головною задачею системи управління є визначення на основі наявних обчислень "у" таких керуючих впливів (кількісного складу ресурсів гарнізону ДСНС), щоб, за умов мінливої оперативної обстановки (впливу збурень "v"), система функціонувала з необхідною ефективністю.

Цей підхід об'єднує різні показники ефективності функціонування системи гарнізону ДСНС в єдину цілісну картину. Вони враховують змінні стани ресурсів гарнізону, які змінюються залежно від часу та ситуації, а також оперативну обстановку та ситуацію з пожежами на території, що контролюється гарнізоном. Крім того, важливою складовою є можливість управління системою. Усі ці фактори працюють разом, щоб досягти конкретних цілей, визначених для певного гарнізону ДСНС.

Динаміка процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС може описуватися векторним випадковим процесом $X(t)$ із залежними компонентами:

$$\begin{aligned} X(t) &= Y(t), Z(t), W(t), V(t), \\ Y(t) &= Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_R(t), \\ Z(t) &= Z_1(t), Z_2(t), \dots, Z_L(t), \\ W(t) &= W_1(t), W_2(t), \dots, W_J(t), \\ V(t) &= V_1(t), V_2(t), \dots, V_G(t). \end{aligned} \quad (1)$$

де $Y_r(t)$ - цілісний випадковий процес, що описує кількість і стадії виникнення подій на території, контрольованій гарнізоном ДСНС, де r - вид події (наприклад, пожежі різних номерів виклику, НС, ДТП та ін.), $r = 1, 2, \dots, R$;

$Z_l(t)$ - випадковий процес, що описує діяльність особового складу, де l - призначення (спеціалізація) особового складу (наприклад, начальник караулу, командир відділення, водій, ствольник та ін), $l = 1, 2, \dots, L$;

$W_j(t)$ - цілочисленний випадковий процес, що описує використання невитратних засобів (пожежна та рятувальна техніка, засоби зв'язку та управління), де j - вид техніки (основні, спеціальні пожежні автомобілі і т.д.), $j = 1, 2, \dots, J$;

$V_g(t)$ - цілісний випадковий процес, що описує використання коштів, де g - вид засобу, що витрачається (паливно-мастильні матеріали, вогнегасні порошки та ін.), $g = 1, 2, \dots, G$.

Загальну кількість наявних ресурсів у гарнізоні ДСНС задаємо векторами:

$$N^{(l)} = (N_1^{(l)}, N_2^{(l)}, \dots, N_L^{(l)}),$$

де $N_i^{(l)}$ - кількість особового складу виду i ;

$$N^{(j)} = (N_1^{(j)}, N_2^{(j)}, \dots, N_J^{(j)}),$$

де $N_i^{(j)}$ - кількість невитратних засобів виду i ;

$$N^{(g)} = (N_1^{(g)}, N_2^{(g)}, \dots, N_G^{(g)}),$$

де $N_i^{(g)}$ - кількість коштів виду i .

Взаємодія складових процесу $X(t)$ полягає в тому, що зміни в одному з елементів впливають на інші. Інтенсивність переходів між різними станами кожної складової залежить не тільки від її власних характеристик, а й від характеристик інших складових. Тобто, процес управління ресурсами гарнізону ДСНС є комплексним, і для правильного реагування потрібно враховувати, як зміни в одній частині системи можуть вплинути на інші [8].

Вважатимемо, що складові процесу $X(t)$ є однорідними розкладанням цілих значень випадкового процесу:

$$Y_r(t) = \sum_{k=1}^{N_r^{(r)}} y_k^{(r)}(t), \quad r = 1, \dots, R, \quad (2)$$

Де $N_r^{(r)}$ - максимально можливе число одночасних подій категорії r (наприклад, пожежі, надзвичайні ситуації, ДТП тощо);

$(y)_k^{(r)} = y_0^{(r)}, y_1^{(r)}, \dots, y_{(n_y)}^{(r)}$ випадкове блукання по певній множині станів для кожної події категорії r і є елементарним цілочисельним випадковим процесом, який описує стадії виникнення та ліквідації події;

$n_y + 1$ - кількість можливих станів (стадії виникнення та ліквідації) однієї події.

$$Z_l(t) = \sum_{k=1}^{N_l^{(l)}} Z_k^{(l)}(t), l = 1, \dots, L, \quad (3)$$

де $Z_k^{(l)} = \{Z_0^{(l)}, Z_1^{(l)}, \dots, Z_{n_l}^{(l)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці особового складу виду l і є елементарним цілим випадковим процесом (наприклад, начальник караулу, командир відділення, водій тощо);

$(n_l + 1)$ - кількість можливих станів однієї одиниці особового складу виду l ;

$$W_j(t) = \sum_{k=1}^{N_j^{(j)}} w_k^{(j)}(t), j = 1, \dots, J, \quad (4)$$

де $w_k^{(j)} = \{w_0^{(j)}, w_1^{(j)}, \dots, w_{n_j}^{(j)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці невитратного засобу виду j і є елементарним цілим випадковим процесом (пожежний техніка, засоби зв'язку і т.д.);

$(n + 1)$ - кількість можливих станів для кожної одиниці невитратного засобу виду j ;

$$V_g(t) = \sum_{k=1}^{N_g^{(g)}} v_k^{(g)}(t), g = 1, \dots, G, \quad (5)$$

де $v_k^{(g)} = \{v_0^{(g)}, v_1^{(g)}, \dots, v_{n_g}^{(g)}\}$ випадкове блукання по певній множині станів однієї одиниці витрачених коштів виду g і є елементарним цілочисловим випадковим процесом;

$(n + 1)$ – кількість можливих станів для однієї одиниці витрачених коштів виду g .

Враховуючи всі розглянуті процеси всередині кожної з груп, то можемо вважати, що вони функціонують незалежно, але статистично однаково, тому приймемо

$\sum_{k=1}^{N_r^{(r)}} y_k^{(r)}(t), \sum_{k=1}^{N_l^{(l)}} z_k^{(l)}(t), \sum_{k=1}^{N_j^{(j)}} w_k^{(j)}(t), \sum_{k=1}^{N_g^{(g)}} v_k^{(g)}(t)$ однорідним канонічним розкладанням відповідних складових процесу $X(t)$. Взаємодія складових процесу $X(t)$ є транзитивною і визначається графом, що представлено на рис. 1.

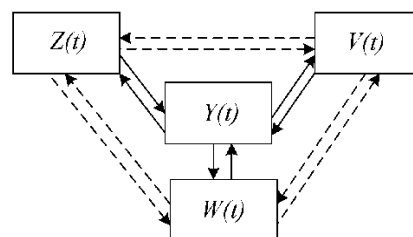


Рисунок 1 – Граф процесу $X(t)$

Для прикладу, під час гасіння пожежі її інтенсивність гасіння буде залежати від рангу пожежі, з одного боку, а з іншого боку - від ефективності роботи пожежних підрозділів, що прибули на гасіння, у тому числі й від кількості пожежних відділень, що були залучені. Тому стосовно проведення процесу гасіння процес $Y(t)$ управляється процесом $W(t)$. Інтенсивність виклику пожежних відділень на будь-яку пожежу (що відноситься до території певної пожежної частини) також залежить як від рангу виклику, що вимагає певну кількість ресурсів на його ліквідацію, так і від кількості вільних відділень, і тому в плані потреби в обслуговуванні процес $Y(t)$ управляє процесом $W(t)$.

Зрозуміло, що процеси $Y(t)$ і $Z(t)$, $Z(t)$ і $W(t)$, $W(t)$ і $V(t)$ є аналогічними до попереднього. Приймаючи далі принцип лінійної взаємодії між складовими процесу $X(t)$ розглянемо докладніше випадкового блукання елементарних одиниць процесів $Y(t)$, $Z(t)$, $W(t)$, $V(t)$ за множинами своїх станів.

Для розробки комплексної математичної моделі процесу функціонування гарнізону ДСНС необхідно внести такі вихідні дані:

$\lambda_{nr} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_R)$ - частота виникнення подій на території, що знаходиться під контролем гарнізону ДСНС (необхідно пам'ятати, що в загальному вигляді всі елементи вектора

λ_{np} - це функції часу, де r -інтенсивність пожеж номеру виклику r , $r = 1,2,\dots, R$;

$$a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1L} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2L} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{R1} & a_{R2} & \dots & a_{RL} \end{pmatrix} -$$

матриця, що відображає потребу у кількості особового складу для гасіння та ліквідації пожеж, ліквідації НС тощо, де a_{RL} - середня кількість необхідних одиниць особового складу виду l при настанні події r ;

$$b = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1J} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2J} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ b_{R1} & b_{R2} & \dots & b_{RJ} \end{pmatrix} -$$

матриця, що відображає потребу невитратних технічних коштів, де b_{RJ} - середня кількість необхідних коштів виду j при настанні події r ;

$$c = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1G} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2G} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{R1} & c_{R2} & \dots & c_{RG} \end{pmatrix}$$

- матриця, що відображає потребу технічних засобів, де c_{RG} - середня кількість необхідних коштів виду g при настанні події r ;

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} & t_{16} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} & t_{25} & t_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{R1} & t_{R2} & t_{R3} & t_{R4} & t_{R5} & t_{R6} \end{pmatrix}$$

- матриця, що відображає тимчасові характеристики гасіння та ліквідації пожеж, де t_{R1} - середній час прямування до місця пожежі (при пожежі номеру виклику r); t_{R2} - середній час розвідки місця пожежі номеру виклику r ; t_{R3} - середній час проведення АРР (при пожежі номеру виклику r); t_{R4} - середній час розгортання сил та засобів (при пожежі номеру виклику r); t_{R5} - середній час ліквідації горіння (при пожежі номеру виклику r); t_{R6} - середній час проведення спеціальних робіт (при пожежі номеру виклику r);

Усі наведені вище показники можна визначити, використовуючи статистичні дані за минулий період для прогнозування їх у майбутньому.

Розглянемо детально складові процесу $X(t)$ з урахування вище наведеної інформації.

Процесу $Y_r(t)$ характерні такі ймовірні стани (рис. 2):

$y_0^{(r)}$ - відсутність подій на території, що контролюється r ;

$y_1^{(r)}$ - стан, коли на контрольованій території виникла подія r ;

$y_2^{(r)}$ - стан, що визначає фазу активної ліквідації події r .

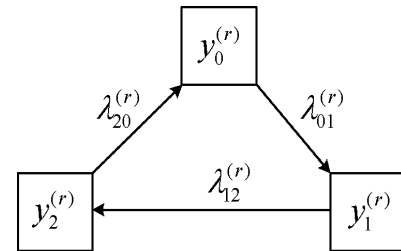


Рисунок 2 – Граф станів процесу $Y_r(t)$

Інтенсивності потоків, що трансформують процес з одного стану в інший, мають такий фізичний зміст:

$\lambda_{01}^{(r)}$ - Інтенсивність потоку вимог на обслуговування (події r), що породжується однією одиницею з максимального можливого числа одночасних подій r , $\lambda_{01}^{(r)} = \lambda_r / m_{y_0}^{(r)}$;

$\lambda_{12}^{(r)}$ - Інтенсивність потоку прийняття на обслуговування, визначається так:

$$\lambda_{12}^{(r)} = \varphi_y(m_{y_1}^{(r)}; m_{w_0}^{(j)}) = \begin{cases} \frac{1}{t_{r1}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} \geq b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{1}{t_{r1}} \cdot \frac{m_{w_0}^{(j)}}{b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} < b_{r1} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases} \quad (6)$$

де $m_{y_1}^{(r)}$, $m_{w_0}^{(j)}$ - середні значення елементів, що знаходяться в відповідному стані (див. нижче); $r, \lambda_{20}^{(r)} = \frac{1}{\sum_{i=2}^6 t_{ri}}$

$\lambda_{20}^{(r)}(t)$ - інтенсивність ліквідації події у процесі $Y_r(t)$, що характеризує середній темп переходу події зі стану активної фази до завершення.

Подальше моделювання стосується процесу $Z^l(t)$, який описує зміну станів одиниці особового складу виду l у часі. Для

кожної одиниці особового складу виду 1 можливі такі стани (рис. 3):

- $z_0^{(l)}$ - перебуває у режимі оперативного чергування;
- $z_1^{(l)}$ - перебуває у режимі слідування до місця події;
- $z_2^{(l)}$ - перебуває у режимі проведення розвідки місця події;
- $z_3^{(l)}$ - перебуває у режимі проведення АРР;

- $z_4^{(l)}$ - перебуває у режимі розгортання сил та засобів ;
- $z_5^{(l)}$ - бере участь у ліквідації події;
- $z_6^{(l)}$ - виконує спеціальні роботи;
- $z_7^{(l)}$ - перебуває у стані згортання сил і засобів та повернення до місця постійної дислокації.

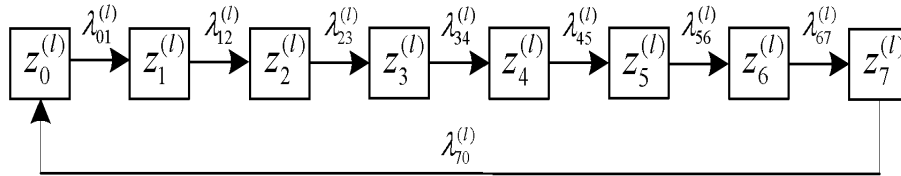


Рисунок 3 – Граф станів одиниці особового складу

Задля визначення інтенсивності викликів $\lambda_{01}^{(l)}$ одиниці особового складу виду 1 розглянемо функцію $\varphi_z(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{z_0}^{(1)})$. З неї можна зробити висновок, що при зростанні числа подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$ сумарна інтенсивність викликів особового складу виду 1 буде визначатися із співвідношення $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}$ та лінійно зростатиме до того моменту, поки буду залишатися вільні одиниці особового складу виду 1, тобто. поки буде виконуватися умова $m_{z_0}^{(l)} \geq \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. У такому випадку середня інтенсивність викликів, що припадає на одиницю особового складу виду 1 буде розраховуватися із співвідношення

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}} \quad (7)$$

Якщо $m_{z_0}^{(l)} < \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}$ середня інтенсивність викликів більша за одиницю

$$\lambda_{12}^{(l)} = \lambda_{70}^{(l)} = \frac{1}{t_1^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r1}}, \lambda_{23}^{(l)} = \frac{1}{t_2^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r2}},$$

$$\lambda_{34}^{(l)} = \frac{1}{t_3^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r3}}, \lambda_{45}^{(l)} = \frac{1}{t_4^l} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r4}}, \quad (10)$$

особового складу виду 1, тоді вона множитиметься на множник $\frac{m_{z_0}^{(l)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$, і буде розраховуватися:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}} \cdot \frac{m_{z_0}^{(l)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \quad (8)$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку викликів одиниці особового складу виду 1 :

$$\lambda_{01}^{(l)} = \varphi_z(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{z_0}^{(l)}) = \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{m_{z_0}^{(l)}}, \text{ за умови } m_{z_0}^{(l)} \geq \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot a_{rl}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{z_0}^{(l)} < \sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases}, \quad (9)$$

Середні значення інтенсивності переходів між різними станами однієї одиниці особового складу виду 1 визначаються із співвідношень:

$$\lambda_{56}^{(I)} = \frac{1}{t_5^I} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r5}}, \lambda_{67}^{(I)} = \frac{1}{t_6^I} = \frac{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R a_{rl} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot t_{r6}}$$

Граф станів одиниці невитратних технічних засобів зображений на рис. 4.

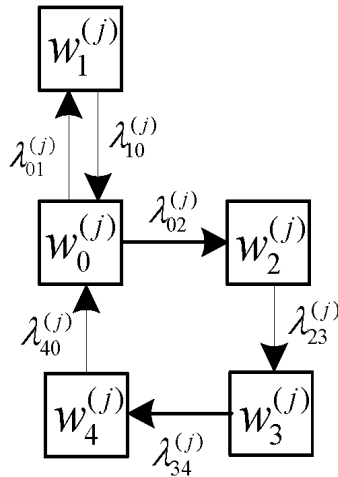


Рисунок 4 – Граф станів одиниці невитратного технічного засобу

$W_0^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу, який знаходиться у підрозділі та не використовується;

$W_1^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу вийшла з ладу та ремонтується;

$W_2^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу отримала виклик і прямує на пожежу;

$W_3^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу використовується на пожежі;

$W_4^{(j)}$ - одиниця невитратного засобу повертається в підрозділ (у разі якщо одиниця засобу вийшла з ладу у станах $W_2^{(j)}, W_3^{(j)}, W_4^{(j)}$, вона однаково повертається у підрозділ і надходить у ремонт);

Інтенсивності потоків переходу між станами одиниці невитратного засобу виду j :

$$\lambda_{01}^{(j)} = \lambda_j^{рем} \cdot \frac{N_j^{(j)} - m_{w_1}^{(j)}}{N_j^{(j)}} \quad (11)$$

де $\lambda_j^{рем}$ - частота ремонту одиниці невитратного засобу виду j ;

$\lambda_{10}^{(j)} = 1/t_j^{рем}$ де $t_j^{рем}$ - середній час відновлення у справний стан одиниці засобу виду j (інформація отримується з статистичних даних за минулий період).

Для визначення інтенсивності $\lambda_{02}^{(j)}$ викликів одиниці невитратного технічного засобу виду j потрібно ввести функцію $\varphi_j(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{w_0}^{(j)})$. Якщо відбувається зростання кількості подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$, то сумарна інтенсивність викликів невитратних технічних засобів виду j визначатиметься співвідношенням $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}$ та буде лінійно зростати до моменту, доки залишатимуться вільні одиниці невитратних засобів виду j , тобто. поки виконується умова $m_{w_0}^{(j)} \geq \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. У такому випадку середня інтенсивність викликів для однієї одиниці невитратних технічних засобів виду j буде визначатись із співвідношення:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{m_{w_0}^{(j)}} \quad (12)$$

Якщо виконується умова $m_{w_0}^{(j)} < \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}$, то середня інтенсивність викликів на одну одиницю невитратних технічних засобів виду j множиться на множник $\frac{m_{w_0}^{(j)}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$:

$$\frac{m_{w_0}^{(j)}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{m_{w_0}^{(j)}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}} \cdot \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку викликів одиниці невитратних технічних засобів виду j :

$$\lambda_{02}^{(j)} = \varphi_j(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{w_0}^{(j)}) =$$

$$\begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{m_{w_0}^{(j)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} \geq \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot b_{rj}}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } m_{w_0}^{(j)} < \sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases} \quad (13)$$

Середні значення інтенсивності невитратних технічних засобів виду j переходів між станами однієї одиниці визначаються із співвідношень:

$$\lambda_{23}^{(j)} = \lambda_{40}^{(j)} = \frac{1}{t_1} = \frac{1}{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_1}^{(r)} \cdot t_{r1}}, \quad \lambda_{34}^{(j)} = \frac{1}{t_{\text{вит}}^j} = \frac{1}{\sum_{i=2}^6 t_{\text{ych}}^j} \quad (14)$$

де $t_{\text{вит}}^j$ - сумарний середній час використання протягом виїзду одиниці невитратних технічних засобів виду j ,

$$\begin{aligned} \overline{t_{\text{ych}}^j} &= \sum_{i=2}^6 \overline{t_i^j} = \overline{t_2^j} + \overline{t_3^j} + \overline{t_4^j} + \overline{t_5^j} + \overline{t_6^j} = \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{12} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R2}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} + \\ &+ \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{13} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R3}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} + \dots + \frac{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} \cdot t_{16} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)} \cdot t_{R6}}{b_{1j} \cdot m_{y_2}^{(1)} + \dots + b_{Rj} \cdot m_{y_2}^{(R)}} = \\ &= \frac{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot (\sum_{i=2}^6 t_{ri})}{\sum_{r=1}^R (b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot (\sum_{i=2}^6 t_{ri}))} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{Звідки } \lambda_{34}^{(j)} = \frac{1}{t_{\text{ych}}^j} = \frac{\sum_{r=1}^R b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R (b_{rj} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot \sum_{i=2}^6 t_{ri})}$$

Граф станів одиниці технічних засобів, що витрачаються зображено на рис. 5.

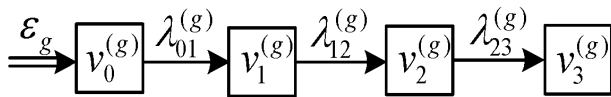


Рисунок 5 – Граф станів одиниці технічного засобу, що витрачається.

На даному графі зображені стани та інтенсивності переходів:

$v_0^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g знаходиться у підрозділі та не використовується;

$v_1^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g , яка необхідна для виконання задач;

$v_2^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g бере участь у обслуговуванні;

$v_3^{(g)}$ - одиниця витраченого засобу виду g списана;

E_g - інтенсивність поповнення запасу витрачених засобів виду g .

Для визначення інтенсивності $\lambda_{01}^{(g)}$ використання одиниці витраченого засобу

виду g необхідно ввести функцію $\varphi_g(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{y_0}^{(g)})$. З якої можна зробити висновки, що у разі зростання кількості подій $m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}$ сумарна інтенсивність використання коштів виду g буде визначатися із співвідношення $\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}$ і лінійно зростатиме до моменту, доки залишатимуться вільні одиниці коштів виду g , тобто. поки буде виконуватися умова $m_{v_0}^{(g)} \geq \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}$. Тоді середня інтенсивність викликів, що припадає на одну одиницю витрачених коштів виду g буде визначатися із співвідношення $\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{v_0}^{(g)}}$.

Якщо $m_{v_0}^{(g)} < \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}$, то середня інтенсивність викликів на одну одиницю витрачених коштів виду g множить на множник $\frac{m_{v_0}^{(g)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}$:

$$\frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{v_0}^{(g)}} \cdot \frac{m_{v_0}^{(g)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}} = \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}} \quad (16)$$

Таким чином, середня інтенсивність потоку використання одиниці коштів виду g :

$$\lambda_{01}^{(s)} = \varphi_s(m_{y_1}^{(1)}, m_{y_1}^{(2)}, \dots, m_{y_1}^{(R)}, m_{y_0}^{(s)}) = \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{m_{y_0}^{(s)}}, \text{ за умови } m_{y_0}^{(s)} \geq \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \frac{\sum_{r=1}^R \lambda_r \cdot c_{rg}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}, \text{ за умови } \sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \end{cases} \quad (17)$$

Середнє значення інтенсивності транспортування витрачених засобів виду g

на місце події: $\lambda_{12}^{(g)} = \frac{1}{t_1^g} = \frac{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_1}^{(r)} \cdot t_{r1}}$.

Для процесу $Y_r(t), r = 1, 2, \dots, R$

$$\begin{cases} \left(\frac{dm_{y_0}^{(r)}}{dt} \right) = -\lambda_{01}^{(r)} \cdot m_{y_0}^{(r)} + \lambda_{20}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \left(\frac{dm_{y_1}^{(r)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(r)} \cdot m_{y_0}^{(r)} - \lambda_{12}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} \\ \left(\frac{dm_{y_2}^{(r)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(r)} \cdot m_{y_1}^{(r)} - \lambda_{20}^{(r)} \cdot m_{y_2}^{(r)} \end{cases}, \quad (19)$$

з умовою нормування: $m_{y_0}^{(r)} + m_{y_1}^{(r)} + m_{y_2}^{(r)} = N_r$,

і початковими умовами: $m_{y_0}^{(r)}(0) = N_r, m_{y_1}^{(r)}(0) = m_{y_2}^{(r)}(0) = 0, r = 1, 2, \dots, R$.

Для особового складу (процесу $Z_l(t), l = 1, 2, \dots, L$:

Середнє значення інтенсивності витрачання (спісування) виду g визначається із співвідношення (за аналогією з невитратними засобами):

$$\lambda_{23}^{(g)} = \frac{1}{t_{\text{вик}}^g} = \frac{\sum_{r=1}^R c_{rg} \cdot m_{y_2}^{(r)}}{\sum_{r=1}^R (c_{rg} \cdot m_{y_2}^{(r)} \cdot \sum_{i=2}^6 t_{ri})} \quad (18)$$

де $t_{\text{вик}}^g$ – сумарний середній час використання протягом виїзду одиниці витрат коштів виду g .

Розглянувши докладно всі складові процесу $X(t)$ можливо скласти такі рівняння динаміки середніх значень із відповідними початковими умовами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dm_{z_0}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{70}^{(l)} \cdot m_{z_7}^{(l)} - \lambda_{01}^{(l)} \cdot m_{z_0}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_1}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(l)} \cdot m_{z_0}^{(l)} - \lambda_{12}^{(l)} \cdot m_{z_1}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_2}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(l)} \cdot m_{z_1}^{(l)} - \lambda_{23}^{(l)} \cdot m_{z_2}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_3}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{23}^{(l)} \cdot m_{z_2}^{(l)} - \lambda_{34}^{(l)} \cdot m_{z_3}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_4}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{34}^{(l)} \cdot m_{z_3}^{(l)} - \lambda_{45}^{(l)} \cdot m_{z_4}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_5}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{45}^{(l)} \cdot m_{z_4}^{(l)} - \lambda_{56}^{(l)} \cdot m_{z_5}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_6}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{56}^{(l)} \cdot m_{z_5}^{(l)} - \lambda_{67}^{(l)} \cdot m_{z_6}^{(l)} \\ \left(\frac{dm_{z_7}^{(l)}}{dt} \right) = \lambda_{67}^{(l)} \cdot m_{z_6}^{(l)} - \lambda_{70}^{(l)} \cdot m_{z_7}^{(l)} \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\sum_{i=0}^7 m_{z_i}^{(l)} = N_l^{(l)}$$

$$m_{z_0}^{(l)} = N_l^{(l)}, m_{z_1}^{(l)}(0) = m_{z_2}^{(l)}(0) = \dots = m_{z_7}^{(l)}(0) = 0, l = 1, 2, \dots, L.$$

Для невитратних технічних засобів (процесу $W_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, J$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dm_{w_0}^{(j)}}{dt} \right) = -(\lambda_{01}^{(j)} + \lambda_{02}^{(j)}) \cdot m_{w_0}^{(j)} + \lambda_{10}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} + \lambda_{40}^{(j)} \cdot m_{w_4}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_1}^{(j)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(j)} \cdot m_{w_0}^{(j)} - \lambda_{10}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_2}^{(j)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(j)} \cdot m_{w_1}^{(j)} - \lambda_{23}^{(j)} \cdot m_{w_2}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_3}^{(j)}}{dt} \right) = \lambda_{23}^{(j)} \cdot m_{w_2}^{(j)} - \lambda_{34}^{(j)} \cdot m_{w_3}^{(j)} \\ \left(\frac{dm_{w_4}^{(j)}}{dt} \right) = \lambda_{34}^{(j)} \cdot m_{w_3}^{(j)} - \lambda_{40}^{(j)} \cdot m_{w_4}^{(j)} \end{array} \right. \quad (21)$$

$$\sum_{i=0}^4 m_{w_i}^{(j)} = N_j^{(j)}$$

$$m_{w_0}^{(j)} = N_j^{(j)}, m_{w_1}^{(j)}(0) = m_{w_2}^{(j)}(0) = \dots = m_{w_4}^{(j)}(0) = 0, j = 1, 2, \dots, J$$

Для засобів, що витрачаються (процес $V_l^{(g)}$, $g = 1, 2, \dots, G$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{dm_{v_0}^{(g)}}{dt} \right) = \varepsilon_g - \lambda_{01}^{(g)} \cdot m_{v_0}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_1}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{01}^{(g)} \cdot m_{v_0}^{(g)} - \lambda_{12}^{(g)} \cdot m_{v_1}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_2}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{12}^{(g)} \cdot m_{v_1}^{(g)} - \lambda_{23}^{(g)} \cdot m_{v_2}^{(g)} \\ \left(\frac{dm_{v_3}^{(g)}}{dt} \right) = \lambda_{23}^{(g)} \cdot m_{v_2}^{(g)} \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\sum_{i=0}^3 m_{v_i}^{(g)}(T) = N_g^{(g)}(0) + \int_0^T \varepsilon_g(t) dt,$$

$$m_{v_0}^{(g)}(0) = N_g^{(g)}, m_{v_1}^{(g)}(0) = m_{v_2}^{(g)}(0) = m_{v_3}^{(g)}(0) = 0, g = 1, 2, \dots, G.$$

Системи диференціальних рівнянь (19), (20), (21) та (22), які описують динаміку середніх значень станів, записуються для однорідних елементів конкретного виду, кількість яких у системі є достатньою для коректного статистичного узагальнення (що відповідає більшості видів ресурсів у гарнізонах середніх і великих міст). Співвідношення (11), (12), (14), (15), (17) та (18) нормують і визначають початкові умови інтегрування зазначених систем диференціальних рівнянь, а також загальну кількість елементів кожного виду ресурсів, що є у гарнізоні ДСНС. Чисельне інтегрування цієї системи диференціальних рівнянь дозволяє отримати динаміку станів усіх елементів системи обслуговування, що в подальшому дає можливість оцінити основні критерії ефективності функціонування гарнізону, такі як оперативність реагування, надійність виконання завдань, раціональність використання ресурсів та стійкість процесів обслуговування.

У випадку, коли в аналізованій системі є лише невелика кількість однорідних одиниць (менше 8, як показують дослідження застосування методу динаміки середніх значень), квазідетермінований підхід (метод динаміки середніх значень), використаний

при побудові системи рівнянь, може спричиняти певні похибки. Це означає, що застосований метод у таких умовах може давати істотну похибку.

Використання системно-кібернетичного підходу дозволяє визначити роль та місце ефективності в управлінні складними системами, до яких також відноситься гарнізон ДСНС. Управління неможливе без попереднього формування цільової функції, яку можна розбити на набір окремих цілей, кожній із яких відповідають контрольні параметри досягнення результату.

Основною метою діяльності гарнізону ДСНС є координація роботи різних підрозділів. Ця мета складається з низки конкретних завдань, для виконання яких програмне забезпечення виконує відповідні функції, результатами яких є певні показники ефективності.

Тому при формуванні цільової функції варто уважно поставитися до окремих функцій та завдань, які вона моделює, виділити з них значущі. А щоб оцінити ефективність функціонування системи, що моделюється, дослідник співвідносить показники контрольних параметрів отриманого результату із заданими (рис. 6).



Рисунок – 6 Системно-кібернетичний підхід до управління ресурсами гарнізону ДСНС

Дана модель дозволяє отримати основні аналітичні закономірності між показниками оперативної діяльності гарнізону ДСНС (часові характеристики прибуття до місця виклику, проведення розвідки місця пожежі, проведення АРР та ін. видів службової діяльності), кількістю ресурсів гарнізону ДСНС, показники оперативної обстановки (динаміки зміни кількості пожеж, загорянь, хибних виїздів, виїзди на інші заходи), а також показниками ефективності функціонування гарнізону ДСНС.

Запропонуємо методику оцінки ефективності управління ресурсами гарнізону ДСНС, що основана на розрахунку значень коефіцієнтів оперативної готовності сил та засобів

$$N^{(l)} = (N_1^{(l)}, N_2^{(l)}, \dots, N_L^{(l)}), N^{(j)} = (N_1^{(j)}, N_2^{(j)}, \dots, N_j^{(j)}), N^{(g)} = (N_1^{(g)}, N_2^{(g)}, \dots, N_g^{(g)}) \quad (24)$$

2 етап, на якому розраховується динаміка чисельності станів елементів ресурсів гарнізону ДСНС:

– формування графів переходів системи та матриць інтенсивності переходів з урахуванням усіх параметрів оперативної діяльності, оперативної обстановки та кількісних показників ресурсів гарнізону ДСНС;

– формування початкових умов та систем диференціальних рівнянь у відповідно до формованого кількісного складу ресурсів гарнізону ДСНС;

– інтегрування систем диференціальних рівнянь за початкових умов.

3 етап, на якому розраховуються значення коефіцієнтів оперативної готовності особового складу

Коефіцієнти оперативної готовності особового складу виду "l" (командири

гарнізону ДСНС, що буде складатися з 3-х етапів:

1 етап, на якому відбувається формування вихідних даних:

– прогнозування пожежної обстановки на території гарнізону ДСНС (формування вектору);

$$\lambda_{пр} = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_R \quad (23)$$

– аналіз оперативної діяльності гарнізону ДСНС (розрахунок значень елементів матриць a , b , c , T);

– формування можливих альтернативних рішень щодо кількісного оснащення ресурсами гарнізону ДСНС:

відділень, водії, пожежні та ін.) для кожного моменту часу "t" розраховуються за наступним співвідношенням:

$$K_{oc,l}(t) = \frac{m_{z_0}^{(l)}(t) + m_{z_7}^{(l)}(t)}{N_L^{(l)}}, \quad (25)$$

де $m_{z_0}^{(l)}(t)$ - середня кількість особового складу виду l , що знаходиться на чергуванні;

$m_{z_7}^{(l)}(t)$ - середня кількість особового складу виду "l" , що перебуває у стані збору та повернення до місця постійної дислокації з місця ліквідації пожежі або НС;

$N_L^{(l)}$ - загальна кількість особового складу виду l .

Коефіцієнт оперативної готовності невитратних матеріальних ресурсів (засобів) виду "j" (автоцистерни, автодрабини, автомобілі газодимозахисної

служби та ін.) для кожного моменту часу "t" визначається співвідношенням:

$$K_{p,j}(t) = \frac{m_{w_0}^{(j)}(t) + m_{w_4}^{(j)}(t)}{N_j^{(j)}}, \quad (26)$$

де $m_{w_0}^{(j)}(t)$ - середня кількість ресурсів та засобів виду j, що перебувають у гарнізоні ДСНС;

$m_{w_4}^{(j)}(t)$ - середня кількість невитратних матеріальних ресурсів, що перебувають у стані збору та повернення до місця постійної дислокації з місця ліквідації пожежі чи НС;

$N_j^{(j)}$ - загальна кількість невитратних матеріальних ресурсів виду j, що знаходиться у розпорядженні гарнізону ДСНС.

Враховуючи, що керівний склад, як правило, можуть цікавити значення коефіцієнтів оперативної готовності особового складу виду $l\bar{K}_{oc,l}(T)$ та невитратних матеріальних ресурсів (коштів) виду $j\bar{K}_{p,j}(T)$ за певний період часу T, то дані коефіцієнти можна визначити наступним чином:

$$\bar{K}_{oc,l} = \frac{1}{T} \int_0^T K_{oc,l}(t) dt, \bar{K}_{p,j}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T K_{p,j}(t) dt \quad (27)$$

де T - розрахунковий період функціонування гарнізону.

У випадку, якщо вихідні дані в моделі, а, отже, і функції коефіцієнтів оперативної готовності мають вигляд частково-постійних функцій, то вирази набудуть наступного вигляду:

$$\bar{K}_{oc,l}(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{oc,l}(t), \bar{K}_{p,j}(T) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T K_{p,j}(t) \quad (28)$$

Комплексні коефіцієнти оперативної готовності особового складу (сил) $K_{oc}(t)$ і невитратних матеріальних ресурсів $K_p(t)$ пропонується визначати як середньозважені суми коефіцієнтів оперативної готовності кожного виду, що входить до складу ресурсів гарнізону на кожен момент часу t :

$$K_{oc}(t) = \sum_{l=1}^L K_{oc,l}(t) \cdot \frac{N_l^{(l)}}{N_L}, K_p(t) = \sum_{j=1}^J K_{p,j}(t) \cdot \frac{N_j^{(j)}}{N_J}, \quad (29)$$

де $N_L = \sum_{l=1}^L N_l^{(l)}, N_J = \sum_{j=1}^J N_j^{(j)}$ - загальна чисельність особового складу (сил) та невитратних матеріальних ресурсів (засобів) гарнізону ДСНС.

На основі динаміки зміни значень комплексних коефіцієнтів оперативної готовності сил та засобів можна розрахувати їхнє середнє значення за визначений період часу T :

$$\bar{K}_{oc}(T) = \frac{\int_0^T K_{oc}(t) dt}{T}, \bar{K}_p(T) = \frac{\int_0^T K_p(t) dt}{T}, \quad (30)$$

для частково-постійних функцій:

$$\bar{K}_{oc}(T) = \frac{\int_0^T K_{oc}(t) dt}{T}, \bar{K}_p(T) = \frac{\int_0^T K_p(t) dt}{T}. \quad (31)$$

Висновки та напрями подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження досягнуто поставленої мети та виконано наступні завдання, що дало змогу отримати такі основні наукові та прикладні результати:

1. Сформовано комплексну стохастичну модель процесу управління ресурсами гарнізону ДСНС. Модель описує взаємозв'язок між подіями, особовим складом, технічними засобами та витратними ресурсами у часі та побудована у вигляді векторного випадкового процесу X(t) із залежними компонентами. Такий підхід забезпечує формалізований опис динаміки ресурсів в умовах транзитивної взаємодії.

2. Виведено системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку середніх значень станів усіх видів ресурсів гарнізону ДСНС. Ці системи отримані на основі квазідетермінованого підходу (методу динаміки середніх значень), що є ефективним та обґрунтованим за умови достатньої кількості однорідних елементів у системі.

3. Розроблено методіку оцінки ефективності управління ресурсами, що базується на розрахунку коефіцієнтів оперативної готовності сил і засобів. Запропоновано трьохетапний алгоритм їх практичного визначення, який зв'язує чисельне інтегрування систем

диференціальних рівнянь із кількісною оцінкою ефективності.

4. Сформовано співвідношення початкових умов, які визначають загальну кількість елементів кожного виду ресурсу, що є необхідним елементом для практичного чисельного інтегрування виведених систем диференціальних рівнянь.

Таким чином, розроблена комплексна математична модель та методика оцінки ефективності управління ресурсами створюють науково-методичне підґрунтя для підвищення обґрунтованості управлінських рішень, оптимізації розподілу матеріально-технічних і фінансових ресурсів та зростання рівня оперативної готовності пожежно-рятувальних підрозділів.

Важливим етапом подальших досліджень та практичної реалізації

отриманих результатів є автоматизація розрахунків за запропонованою моделлю та методикою оцінки ефективності управління ресурсами гарнізону ДСНС.

Ключовим кроком на цьому шляху є розробка системи підтримки прийняття рішень, яка безпосередньо відповідає за управління ресурсами гарнізону ДСНС. Така система дозволить автоматизувати процеси аналізу, розрахунку та оптимізації використання ресурсів у реальному часі, забезпечуючи своєчасне реагування на надзвичайні ситуації, зменшення впливу людського фактору і підвищення загальної ефективності роботи.

У результаті, інтеграція цієї системи у щоденну діяльність гарнізону сприятиме більш ефективному плануванню та розподілу ресурсів, що є критично важливим для підвищення рівня безпеки та оперативності дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Zhang G., Liu X., Peng Y. A Simulation Optimization Method for Scheduling Automated Guided Vehicles in a Stochastic Warehouse Management System. *2023 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2023. P. 3238–3249. URL: <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407793>.
- Ingolfsson A., Erkut E., Budge S. Simulation of single start station for Edmonton EMS. *Journal of the Operational Research Society*. 2003. Vol. 54, no. 7. P. 736–746. URL: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601574>.
- Fundamentals of queueing theory. J. F. Shortle, J. M. Thompson, D. Gross, C. M. Harris. 5th ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2018. 541 p. URL: <https://www.scribd.com/document/896766557/Fundamentals-of-Queueing-Theory-5th-Edition-PDF>.
- Minas J., Simpson N., Tacheva Z. Modeling emergency response operations: A theory building survey. *Computers & Operations Research*. 2020. Vol. 119. P. 104921. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>.
- Новожилова М. В., Михайловська Ю. В. Розробка організаційно-технічного метод формування ресурсного забезпечення реагування на надзвичайні ситуації. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400160>.
- Климась Р. В., Одинець А. В., Матвійчук Д. Я., Несенюк Л. П. Результати аналізу основних показників статистики пожеж в Україні по відношенню до часу прибуття першого підрозділу пожежної охорони. URL: <https://doi.org/10.52363/nvz.2019.1.76-84>.
- Кустов М. В., Федоряка О. І., Корнієнко Р. В. Ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. URL: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-5>.
- Runefors M. Measuring the Capabilities of the Swedish Fire Service to Save Lives in Residential Fires. *Fire Technology*. 2020. Vol. 56, no. 2. P. 583–603. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00892-y>.
- Matinrad N. An Operations Research Approach for Daily Emergency Management. 2019. URL: <https://doi.org/10.3384/lic.diva-157099>.
- Рубан І., Тютюнник В., Тютюнник О. Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. Т. 40, № 1. С. 75–84. URL: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84>.
- Шабельник Т. В. Математичне моделювання соціально-економічних систем. Маріуполь : МДУ, 2019. 135 с. URL: <http://www.repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28090>.

REFERENCES

- Zhang, G., Liu, X., & Peng, Y. (2023). A Simulation Optimization Method for Scheduling Automated Guided Vehicles in a Stochastic Warehouse Management System. In *2023 Winter Simulation Conference*, 3238–3249. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407793>.
- Ingolfsson, A., Erkut, E., & Budge, S. (2003). Simulation of single start station for Edmonton EMS. *Journal of the Operational Research Society*, 54(7), 736–746. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601574>.
- Gross, D., Shortle, J. F., Thompson, J. M., & Harris, C. M. (2018). *Fundamentals of queueing theory* (5th ed.). John Wiley & Sons. <https://www.scribd.com/document/896766557/Fundamentals-of-Queueing-Theory-5th-Edition-PDF>.

4. Minas, J., Simpson, N., & Tacheva, Z. (2020). Modeling emergency response operations: A theory building survey. *Computers & Operations Research*, 119, 104921. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104921>.
5. Novozhylova M. V., Mykhailovska Yu. V. (2020). Rozrobka orhanizatsiino-tekhnichnoho metod formuvannia resursnoho zabezpechennia reahuvannia na nadzvychaini sytuatsii. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400160>.
6. Klymas, R., Odynets, A., Matviichuk, D., & Neseniuk, L. (2019). Rezultaty analizu osnovnykh pokaznykiv statystyky pozhezh v ukraini po vidnoshenniu do chasu prybuttia pershoho pidrozdilu pozheznoi okhorony. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyt ta pozhezna bezpeka*, 1(1(7)), 76–84. <https://doi.org/10.52363/nvcz.2019.1.76-84>.
7. Kustov, M. V., Fedoriaka, O. I., & Korniienko, R. V. (2022). Efektyvnist metodu terytorialnoho rozmishchennia pozheznykh pidrozdiliv riznoi funktsionalnoi spromozhnosti. *Problems of Emergency Situations*, 2(36), 54–65. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-36-5>.
8. Runefors, M. (2020). Measuring the Capabilities of the Swedish Fire Service to Save Lives in Residential Fires. *Fire Technology*, 56(2), 583–603. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00892-y>.
9. Matinrad, N. (2019). *An Operations Research Approach for Daily Emergency Management*. <https://doi.org/10.3384/lic.diva-157099>.
10. Ruban, I., Tiutiunyk, V., & Tiutiunyk, O. (2021). Osoblyvosti stvorennia systemy pidtrymky pryiniattia antykryzovykh rishen v umovakh nevyznachenosti vkhidnoi informatsii pry nadzvychainykh sytuatsiakh. *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 40(1), 75–84. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84>.
11. Shabelnyk, T. V. (2019). Matematyчне modeliuвання sotsialno-ekonomichnykh system. MDU. <http://www.repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28090>.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR DESCRIBING AND EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF DECISION-MAKING AND RESOURCE MANAGEMENT IN THE STATE EMERGENCY SERVICE GARRISON

S. Shevchenko¹, V. Lutsyk¹, O. Kovalev², Y. Gaponenko¹, M. Zmaha¹

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

²Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in Kharkiv Region, Kharkiv, Ukraine

KEYWORDS:

efficiency, fire and rescue units, garrison, modeling, operational readiness, resource management, State Emergency Service, stochastic model.

ABSTRACT

The article solves an urgent scientific and applied problem regarding increasing the efficiency of resource management of fire and rescue units of the garrison of the State Emergency Service of Ukraine. The relevance of the study is due to the need to optimize the distribution of forces and means in conditions of high intensity of calls and limited resource provision. The object of the study is the processes of functioning of the garrison as a complex dynamic system subject to the influence of random factors. A system-cybernetic approach is applied in the work, within which the state of the system is determined by the dynamic interaction of four key groups of resources: incoming events, personnel, technical means and material means. The scientific novelty of the study lies in the development of a complex stochastic mathematical model, where the functioning of units is represented as a vector random process with dependent components. A formalized description of the behavior of resource units through transition graphs between probabilistic states is proposed. Unlike existing approaches, the model defines the intensity functions of transition flows, which dynamically depend on the average values of the states of other resource groups, which allows taking into account the effect of transitive interaction in the system. The application of the quasi-deterministic approach (the method of dynamics of average values) allowed moving from a stochastic description to systems of differential equations describing the evolution of resource indicators in time. The practical significance of the obtained results lies in the development of an algorithm for calculating operational readiness coefficients, which act as integrated indicators of management efficiency. Ratios of initial conditions for numerical integration of the derived systems of equations are formed, which makes it possible to predict the level of garrison readiness under various load scenarios. The modeling results create a scientific and methodological basis for making informed management decisions regarding the rational use of forces and means, ensuring the stability of unit functioning during peak periods.