

УДК 656.26

М.Д. Кацман<sup>1</sup>, В.К. Мироненко<sup>2</sup>, В.І. Мацюк<sup>2</sup><sup>1</sup> Південно-Західна залізниця, Київ<sup>2</sup> Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ

## ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РЕАГУВАННЯМ НА ЗАЛІЗНИЧНІ НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ

*Розглянутий порядок сіткового планування в умовах невизначеності часових параметрів робіт при мережецентричному управлінні ліквідацією наслідків залізничних надзвичайних ситуацій. Наведений приклад застосування мережецентричного методу для визначення обґрунтованого плану та часу виконання ліквідаційних робіт з належним рівнем надійності.*

**Ключові слова:** сіткове планування, мережецентричне управління, залізнична надзвичайна ситуація, рівень надійності.

### Вступ

Мережецентрична система народилася у сфері, нібито далекій від залізничного транспорту – при обґрунтуванні концепції інформаційних війн, а також розвинутих систем тилового і технічного постачання військ. Це принципово поліпшило можливості керування військами за рахунок систематичного спостереження за змінами в обстановці, її динамічного та адекватного оцінювання [1]. Мережецентрична концепція ведення бойових дій полягає у об'єднанні усіх ударних, логістичних, інформаційних, дипломатичних, соціальних та інших засобів у єдину систему, яка містить у собі усі рівні і напрями управління, і дозволяє здійснити принцип зосередження на результатах, а не на зосередженні сил [2]. На нашу думку, мережецентричний підхід є доцільним для застосування при реагуванні на залізничні надзвичайні ситуації та раціональному плануванні ліквідаційних робіт.

### Основна частина

Особливістю мережецентричного управління є планування та виконання операцій у єдиному просторі станів системи, що дозволяє синтезувати команди управління для усіх виконавців скоординовано у часі та просторі, оптимально розподіляючи між ними цілі та завдання. З урахуванням порядку залучення ліквідаційних підрозділів, їх оснащення, рельєфу місцевості, ступеню професійної підготовки працівників, характеристик uszkodжень елементів інфраструктури залізниць та рухомого складу розробляється сітковий план-графік дій ліквідаційних підрозділів як по цілях (об'єктах) проведення відновних робіт, так й щодо здійснення технологічного комплексу робіт на кожному з аварійних об'єктів і рухомому складі. Тобто планування здійснюється по горизонталі та вертикалі з узгодженням і синхронізацією робіт.

За допомогою такого плану-графіку визначається імовірність успішності дій таких підрозділів

при вибраному варіанті ліквідації надзвичайної ситуації, тобто прийнятим рішенням керівника ліквідації аварії (горизонтальне планування по цілях).

При великому значенні імовірності (наприклад, 0,8) успішності дій ліквідаційних підрозділів здійснюється їх зосередження на місці надзвичайної ситуації, визначаються заходи безпеки та розроблюються (доповнюються необхідними технологічними операціями по кожному з аварійних елементів інфраструктури і рухомого складу) сітковий графік виконання ліквідаційних операцій (планування по вертикалі). При недостатньому значенні імовірності (наприклад, 0,2) успішності дій ліквідаційних підрозділів, прийняте рішення відхиляється й приймається інше – новий варіант проведення ліквідаційних заходів. При проведенні ліквідаційних операцій оперативним штабом з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації здійснюється контроль за їх проведенням. При виявленні відхилень від прийнятого сіткового графіку, аналізуються їх причини та здійснюються необхідні корективи. Ліквідація наслідків надзвичайної ситуації на різнохарактерних аварійних об'єктах залізниць являє собою складний процес функціонування багатьох підрозділів залізниць та залучених до цього сил і засобів інших організацій, який потребує узгоджених дій за місцем і часом.

Ліквідаційні підрозділи з відповідними пунктами управління являють собою складну динамічну систему. Для ефективного оперативного планування і управління функціонуванням такими складними системами нині широко застосовується метод сіткового планування і управління (СПУ), який дозволяє реалізувати системний підхід, застосовувати математичні моделі та сучасні комп'ютерні технології, що дає змогу здійснення логіко-математичного опису процесів, які моделюються, та алгоритмізації розрахунків необхідних параметрів за допомогою сіткового графіку (діаграмою сіткової моделі).

Застосування сіткового моделювання при плануванні та управлінні складними системами дозволяє розв'язувати такі проблеми:

– чітко відобразити склад і структуру керованого процесу, з необхідним ступенем деталізації операцій, з яких складається такий процес, виявити взаємозв'язки між цими процесами та операціями, що необхідні для досягнення частинних та кінцевих цілей, чітко розподілити обов'язки між виконавцями операцій, які необхідні для реалізації усього процесу;

– використовувати досвід і знання найбільш досвідчених фахівців щодо складання планів і керування складними системами;

виявити резерви сил, засобів і часу, які марнуються при нерациональній організації керованого процесу, здійснити контроль за ходом процесу відразу по декількох напрямках, й, навпаки, виключити з контролю операції, що не впливають на часові характеристики процесу, знаходити «вузькі місця» та своєчасно їх долати;

– з урахуванням фактичного ходу процесу, обґрунтовано корегувати раніше прийняті управлінські рішення, отримувати прогнози подальшого розвитку процесу, передбачати можливі відхилення процесу від плану та наслідки, які можуть впливати на процес в цілому;

– отримувати кількісні оцінки параметрів керованого процесу і ступені невизначеності прогнозів його протікання;

– спростити внесення змін, уточнень та доповнень у плани, тим самим збільшити гнучкість і необхідну періодичність планування, спростити схему звітності, забезпечити швидке підключення у роботу нових виконавців.

Аналіз сіткової моделі здійснюється за допомогою розрахунків значень її параметрів, тобто величин, які характеризують часові співвідношення між подіями і операціями, вид, обсяг і кількість ресурсів, що витрачаються у процесі виконання операцій.

Виходячи з того, що тривалість операцій з локалізації надзвичайної ситуації та ліквідації її наслідків є випадковою величиною, то оцінка значення цієї величини буде у найбільшому ступені впливати на відповідність реального графіка запланованому, й, як наслідок, на успішність дій ліквідаційних підрозділів. Для оцінювання часу виконання операцій, як правило, визначаються оцінки щодо тривалості виконуваних операцій ( $i, j$ ):

– оптимістична оцінка  $t_{оп}(i, j)$ , тобто тривалість операцій ( $i, j$ ) за найсприятливіших умов  $t_{оп}(i, j)=a(i, j)$ ;

– песимістична оцінка  $t_{п}(i, j)$ , тобто тривалість операцій ( $i, j$ ) за найнесприятливіших умов  $t_{п}(i, j)=b(i, j)$ ;

– найбільша імовірна оцінка  $t_{іп}(i, j)$ , тобто тривалість роботи ( $i, j$ ) за нормальних умов  $t_{іп}(i, j)=m(i, j)$ .

Іншими словами, тривалість роботи ( $i, j$ ) є випадковою величиною, що характеризується певним законом розподілу та відповідними числовими характеристиками – математичним сподіванням  $\overline{t(i, j)}$  і дисперсією  $\sigma^2(i, j)$ .

Закон розподілу має такі властивості: безперервність; унімодальність, тобто має один максимум у кривій розподілу; додатна асиметрія, тобто максимум кривої зміщений вліво відносно медіани. Такі властивості має бета-розподіл. У загальному випадку формула бета-розподілу випадкової величини  $t$ , заданої на інтервалі  $(0, 1]$  має вигляд [3]:

$$f_t(t, p, q) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq 0; \\ B^{-1}(p, q)t^{p-1}(1-t)^{q-1}, & \text{при } 0 < t \leq 1; \\ 0, & \text{при } t > 1, \end{cases} \quad (1)$$

де  $B(p, q)$  – бета-функція, що визначається виразом

$$B(p, q) = \int_0^1 (1-t)^{p-1} dt = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}, \quad (2)$$

де  $\Gamma(x)$  – гамма функція, яка визначається з формули

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{x-1} dy. \quad (3)$$

Відомо, що для цілих  $x$  формула  $\Gamma(x)$  визначається виразом  $E(x)=(x-1)!$ . Виходячи з того, що на практиці значення розглянутих вище оцінок для реальних операцій не відомі, для оцінювання цих величин застосовуються експертні або статистичні методи. Важливим завданням при цьому є коректне оцінювання тривалості виконання операцій. Розробниками методу PERT [4] отримані такі вирази для оцінювання математичного сподівання та дисперсії

$$M[t(i, j)] = \frac{1}{6}[f(i, j) + 4m(i, j) + b(i, j)]; \quad (4)$$

$$\sigma^2[t(i, j)] = \frac{1}{6}[b(i, j) - a(i, j)].$$

У роботі В.С.Попова отримані такі характеристики бета розподілу [5]:

$$M[t(i, j)] = \frac{1}{7}[a(i, j) + 5m(i, j) + b(i, j)]; \quad (5)$$

$$\sigma^2[t(i, j)] = \frac{1}{36}[b(i, j) - a(i, j)]^2.$$

Вирази (1) і (2) відносяться до так званого трьохочіночного методу, бо у виразах застосовуються три оцінки  $a(i, j)$ ,  $b(i, j)$  та  $m(i, j)$ .

Хороші результати дає використання двоочіночного методу при застосуванні бета-розподілу. Числові характеристики при такому методі мають вигляд [5]:

$$M[t(i, j)] = 0,2[3a(i, j) + 2b(i, j)];$$

$$\sigma^2[t(i, j)] = 0,04[b(i, j) - a(i, j)]^2. \quad (6)$$

$$m[t(i, j)] = \frac{1}{3}[2a(i, j) - b(i, j)].$$

Застосування двоочіночного методу має перевагу в тому, що часто експертам важко отримати оцінку моди, яка не застосовується при цьому методі.

Тривалість шляху  $L$  для  $\beta$ -розподілу згідно з центральною граничною теоремою Ляпунова розподілена за нормальним законом, звідки випливає, що

середня тривалість операцій цього шляху визначається як сума середніх значень операцій, що на ньому знаходяться, тобто:

$$M[L] = \sum_{(i,j) \in L} M[t(i,j)]; \sigma^2[L] = \sum_{(i,j) \in L} \sigma^2[t(i,j)]. \quad (7)$$

Оцінка імовірності того, що термін виконання усього комплексу операцій щодо локалізації надзвичайної ситуації та ліквідації її наслідків ( $t_{кр}$ ) не перевищить встановленого директивного строку  $T$  визначається співвідношенням:

$$P(t_{кр} < T) = 0,5 + 0,5\Phi. \quad (8)$$

Якщо, наприклад,  $P(t_{кр} < T) = 0,3$ , то імовірність невиконання директивного строку виконання ліквідаційного комплексу велика, що спонукає до прийняття додаткових заходів чи зміни варіанту проведення операцій. Коли  $P(t_{кр} < T) > 0,8$ , то з достатнім ступенем надійності можна прогнозувати вчасне виконання комплексу ліквідаційних операцій.

У деяких випадках необхідно визначити максимальний строк виконання ліквідаційних робіт  $T$ , який можливий із заданою імовірністю  $\beta$ . У цьому випадку:

$$T = M[t_{кр}] + z\beta \cdot \sigma_{кр}^2, \quad (9)$$

де  $z\beta$  – нормоване відхилення випадкової величини, яке визначається за допомогою функції Лапласа  $\Phi(z\beta) = \beta; z = \frac{T - t_{кр}}{\sigma}$ .

Розглянемо приклад. Структура сіткової моделі та оцінки тривалості робіт подані у таблиці 1. Необхідно отримати усі характеристики сіткової моделі, оцінити імовірність виконання усього комплексу ліквідаційних робіт за 52 год., за 45 год. та оцінити максимально можливий строк виконання усього комплексу операцій з імовірністю  $P=0,95$ .

У трьох перших графах табл. 1 знаходяться вихідні дані, а у двох останніх графах таблиці – результати розрахунків за формулами (6).

Таблиця 1

Результати розрахунків

Операція (i, j)	Тривалість		M[t(i, j)]	$\sigma^2[t(i, j)]$
	a(i, j)	b(i, j)		
(1,2)	7,5	11,25	7,5	0,56
(2,3)	6	9,75	7,5	0,56
(2,4)	4,5	9	4,5	2,25
(2,5)	1,5	8,25	6	0,56
(3,7)	0,75	5,25	1,5	0,81
(4,5)	7,5	11,25	9	0,56
(4,6)	4,5	8,25	6	0,56
(4,9)	7,5	15	10,5	2,25
(5,8)	3	6,75	4,5	0,56
(5,10)	10,5	18	13,5	2,25
(6,9)	0	0	0	0,00
(6,11)	4,5	12	7,5	2,25
(7,10)	6	13,5	9	2,25
(8,10)	3	10,5	6	2,25
(9,10)	1,5	9	4,5	2,25
(10,11)	12	15,75	13,5	0,56

За результатами таблиці отримуємо сіткову модель (рис. 1). Критичний шлях  $L_{кр}=(1,2,4,5,10,11)$ , а його тривалість  $t_{кр}=48$  год, а його дисперсія складає

$$\sigma_{кр}^2 = \sigma^2(1,2) + \sigma^2(4,5) + \sigma^2(5,10) + \sigma^2(10,11) = 6,18.$$

$$\text{Звідки } \sqrt{\sigma_{кр}^2} = 2,48.$$

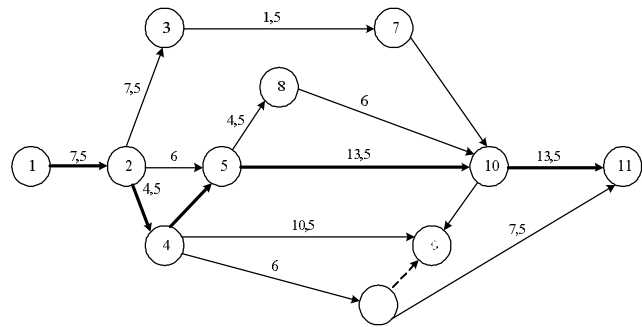


Рис. 1. Сіткова модель

Тоді:

$$P(t_{кр} < 50) = 0,5 + 0,5\Phi\left\{\frac{52 - 48}{2,48}\right\} = 0,5 + 0,5\Phi\{1,6\} = 0,5 + 0,5 \cdot 0,89 = 0,945$$

$$P(t_{кр} < 45) = 0,5 + 0,5\Phi\left\{\frac{45 - 48}{2,48}\right\} = 0,5 + 0,5\Phi\{-1,2\} = 0,5 - 0,5 \cdot 0,77 = 0,12.$$

Таким чином, імовірність виконання комплексу робіт за термін часу не більше 52 год. складає  $P=0,945$ , а за 45 год.  $P=0,12$ . Практично це означає, що необгрунтоване прагнення до скорочення часу виконання робіт призведе до протилежного результату – зриву їх вчасного виконання!

Для розв'язування оберненої задачі щодо оцінювання максимального строку виконання робіт з імовірністю  $P = 0,95$  знаходимо у таблиці стандартного нормального розподілу найближче значення до  $P=0,95$ , таке значення буде  $P=0,9545$ , що відповідає  $z=1,9$ . Тоді з формули (9) маємо:  $T=48+1,9 \cdot 2,48=52,7$  год.

Таким чином, максимальний термін виконання усього комплексу ліквідаційних операцій при заданому рівні імовірності  $P=0,95$  складає 52 год. 42 хв.

Окремої уваги заслуговує оптимізація вартості виконання операцій методом «час-вартість», однак це питання потребує додаткового обгрунтування та створення у кожному випадку відповідних математичних моделей [5]. Оптимізація сіткового графіка являє собою процес поліпшення організації виконання комплексу операцій з урахуванням встановленого строку його виконання. При використанні цього методу передбачається, що зменшення тривалості операцій пропорційно зростанню її вартості. З наведеного вище видно, що кожна операція (i,j) характеризується тривалістю  $t(i,j)$ , яка може знаходитися у межах  $a(i,j) \leq t(i,j) \leq b(i,j)$ . Величина  $h(i,j)$ , що дорівнює тангенсу кута  $\alpha$  нахилу апроксимуючої прямої, визначає витрати на прискорення роботи (i,j) у порівнянні з нормальною тривалістю на одиницю часу, тобто:

$$h(i, j) = \text{tga} = \frac{c_{\max}(i, j) - c_{\min}(i, j)}{b - a}. \quad (10)$$

Вартість  $c(i, j)$  операції  $(i, j)$  міститься у межах

$$c_{\min}(i, j) \leq c(i, j) \leq c_{\max}(i, j),$$

де  $c_{\min}(i, j)$  – вартість операції  $(i, j)$  при нормальній її тривалості;  $c_{\max}(i, j)$  – вартість операції при максимальній її тривалості.

Вартість операції  $c(i, j)$  визначається виразом:

$$c(i, j) = c_{\min}(i, j) = (c_{\max}(i, j) - c_{\min}(i, j)) / (b - a) = (11) \\ = c_{\min}(i, j) + (b - t(i, j))h.$$

Допустимий розмір збільшення тривалості даної операції:  $\Delta t(i, j) = \min\{b - t(i, j), R_c(i, j)\}$ , де  $R_c(i, j)$  – вільний резерв часу  $R_c$  операції  $(i, j)$ , що є частиною повного резерву часу, на яку можна збільшити її тривалість, не змінюючи при цьому ранішнього строку її кінцевої події. Такий резерв часу можна використовувати при виконанні даної операції, якщо її початкова та кінцева події здійснюються у свої найранішні строки  $t_p(i)$  та  $t_p(j)$ . Тобто

$$R_c(i, j) = t_p(j) - t_p(i) - t(i, j). \quad (12)$$

Оптимальна тривалість операції  $t_{\text{опт}}(i, j) = t(i, j) + \Delta t(i, j)$ .

Зміна вартості операції  $\Delta c(i, j)$  при скороченні її тривалості виражається формулою:

$$\Delta c(i, j) = \Delta t_{\text{опт}}(i, j) h(i, j). \quad (13)$$

У цій формулі  $h(i, j)$  можна вважати коефіцієнтом втрат на прискорення операції. Відтак вартість операції після оптимізації визначається з формули:

$$c_{\text{опт}}(i, j) = c(i, j) - \Delta c(i, j). \quad (14)$$

Вартість комплексу операцій після оптимізації:

$$\Delta c = \sum_{(i, j)} c(i, j) - \sum_{(i, j)} c_{\text{опт}}(i, j). \quad (15)$$

У результаті такої оптимізації сіткового графіка, при незмінній тривалості виконання усього комплексу операцій, за рахунок збільшення тривалості операцій, які мають вільний резерв часу, зменшується вартість виконання усього комплексу операцій.

## Висновки

Узагальнення успішного досвіду використання мережецентричного підходу у військовій сфері та

особливостей динамічних процесів виникнення, локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій на транспорті показало, що такий підхід є доцільним для застосування при реагуванні на залізничні надзвичайні ситуації та раціональному плануванні ліквідаційних робіт.

Наведені результати переконливо доводять необхідність практичного застосування в умовах невизначеності часових параметрів ліквідаційних процесів та робіт комплексу розрахункових методів мережецентричного управління та сіткового планування, що дозволяє встановлювати обґрунтовані терміни успішного виконання робіт.

Запропонований порядок планування робіт на основі сіткової моделі процесу ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та розрахункові методи отримання відповідних кількісних характеристик процесу є методологічною основою для створення СППР керівника ліквідації залізничної надзвичайної ситуації.

## Список літератури

1. *Парадигма сетецентрического управления и ее влияние на процессы управления войсками [Электронный ресурс] / В.А. Короленко, В.К. Синявский, и др. – Режим доступа: [http://www.agat.by/pres/statia\\_nauka-3.pdf](http://www.agat.by/pres/statia_nauka-3.pdf).*
2. *Паришин Н.С. Концепции сетецентрического управления ВС США, Великобритании и ОВС НАТО. Общее и различия / Н.С. Паришин, Ю. Кожяков // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 4. – С. 17-18.*
3. *Карагодова О.О. Дослідження операцій: навч. посіб. / О.О. Карагодова, В.П. Кигель, В.Д. Рожок. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 256 с.*
4. *Кофман А. Сетевые методы планирования. Применение системы ПЕРТ и ее разновидностей при управлении производственными и научно-исследовательскими проектами / А. Кофман, Г. Дебазей. – М.: Прогресс, 1968. – 182 с.*
5. *Сетевое моделирование целенаправленных процессов. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: [http://guar.ru/guar/kaf82/meth/mat\\_model\\_2.pdf](http://guar.ru/guar/kaf82/meth/mat_model_2.pdf).*

Надійшла до редколегії 8.02.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕАГИРОВАНИЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ

М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, В.И. Мацюк

*Рассмотрен порядок сетевого планирования в условиях неопределенности временных параметров работ при сетецентрическом управлении ликвидацией последствий железнодорожных чрезвычайных ситуаций. Приведен пример применения сетецентрического метода для определения обоснованного плана и времени выполнения ликвидационных работ с надлежащим уровнем надежности.*

**Ключевые слова:** сетевое планирование, сетецентрическое управление, железнодорожная чрезвычайная ситуация, уровень надежности.

## PRACTICAL APPLICATION OF NETWORK-CENTRIC METHODS FOR A MANAGEMENT REACTING ON RAILWAY EXTRAORDINARY SITUATIONS

M.D. Kacman, V.K. Mironenko, V.I. Masyuk

*The article considers the procedure of network planning in an uncertain timing of works using network-centric management of the liquidation of the of rail emergency consequences and an example of the network-centric method application for determining the reasonable plan and the execution time of liquidating works with an appropriate reliability level.*

**Keywords:** network planning, network-centric management, rail emergency, reliability level.