

УДК 519.87:316.458.6

В.Б. Кононов<sup>1</sup>, Ю.І. Шевяков<sup>1</sup>, Д.А. Філістєєв<sup>2</sup>, В.В. Бурцева<sup>1</sup><sup>1</sup> Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Центральне управління метрології і стандартизації Збройних Сил України  
Озброєння Збройних Сил України, Київ

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНУ РОЗПОДІЛУ Й ВІДПОВІДНИХ ОПТИМАЛЬНИХ МАРШРУТІВ РУХУ ВІЌЗНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ГРУП В УМОВАХ ОБМЕЖЕННЯ ВИТРАТ НА МЕТРОЛОГІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

В статті запропоновано метод визначення оптимального плану розподілу й відповідних оптимальних маршрутів руху виїзних метрологічних груп за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки в умовах обмеження сумарних коштів на метрологічне обслуговування військових частин та підрозділів й транспортних витрат.

**Ключові слова:** озброєння та військова техніка, метрологічне обслуговування, оптимальний план розподілу виїзних метрологічних груп, оптимальні маршрути руху.

### Вступ

**Постановка задачі.** Проведення метрологічно-обслуговування зразків озброєння та військової техніки військ (сил) військових частин та підрозділів за місцями їх дислокації силами виїзних метрологічних груп (ВМГ) є одним із основних елементів підтримання військових частин та підрозділів у постійній бойовій готовності. Метрологічне обслуговування озброєння та військової техніки частин та підрозділів здійснюється відповідно до плану-завдання, що затверджується командиром (головним інженером) метрологічної бази (центру) на підставі річного графіка робіт ВМГ [2]. У плані-завданні визначаються маршрут руху ВМГ, гарнізони й військові частини, що заплановані до обслуговування, місця дозавправлення паливом, відповідальні за організацію робіт ВМГ у гарнізонах (військових частинах), терміни виконання робіт, організація зв'язку, тощо [2 – 4]. Нажаль, існуючі методи планування робіт ВМГ не враховують питання оптимізації розподілу ВМГ при проведенні метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки військового призначення (ЗВТВП) військових частин (підрозділів) з урахуванням:

- загального часу метрологічного обслуговування ЗВТВП у місцях дислокації військових частин та підрозділів;

- загальної вартості метрологічного обслуговування ЗВТВП;

- маршрутів руху для кожної ВМГ, що здійснює метрологічне обслуговування ЗВТВП, стосовно місць дислокації військових частин (підрозділів).

Все це приводить до невиправданого зростання парку зразкових засобів вимірювання та зниження коефіцієнту їх використання [4]. Крім того, здійснюється дублювання у роботі ВМГ, що безпосеред-

ньо впливає на підвищення витрат моторесурсу пересувних лабораторій вимірювальної техніки, паливно-мастильних матеріалів й витрат на відрядження обслуги ВМГ. При цьому робота однакових за призначенням ВМГ різних метрологічних частин (підрозділів) в одному гарнізоні, нажаль, є звичайним явищем. Враховуючи це, розробка методу визначення оптимального плану розподілу ВМГ і відповідних оптимальних маршрутів їх пересування до місць дислокації військових частин та підрозділів у регіоні з урахуванням загального часу при обмеженнях на загальну вартість метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) та транспортних витрат є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз літератури.** Організація виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України викладена в [1, 2]. Питання застосування ВМГ у складі пересувних засобів метрологічного обслуговування викладені в [3, 4]. В статті [5] запропоновано математичну модель визначення оптимального плану й оптимальних маршрутів руху виїзної метрологічної групи метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки військ (сил) за критерієм мінімуму загального часу розподілу. Запропонований в статті [6] метод визначення оптимального плану розподілу й відповідних оптимальних маршрутів руху виїзних метрологічних груп за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки розглянутий для випадку, при якому кожна військова частина (підрозділ) підлягає метрологічному обслуговуванню ЗВТВП у повному обсязі, відповідно до обсягів замовлення при умові достатності фінансових коштів. Але в цієї статті не надаються відомості щодо методів вирішення задачі, що розглядається, в

умовах обмеження сумарних коштів на метрологічне обслуговування військових частин та підрозділів й транспортних витрат. В [7] та [8] надані відомості про методи оптимізації й практичні рекомендації щодо розв'язання оптимізаційних задач в середовищі Excel. Нажаль, їх недостатньо для вирішення решти актуальних завдань метрологічного забезпечення військ (сил).

**Метою статті** є розробка методу визначення оптимального плану розподілу ВМГ і відповідних оптимальних маршрутів їх пересування до місць дислокації військових частин та підрозділів за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування ЗВТВП в умовах обмеження витрат на метрологічне обслуговування ЗВТВП.

### Основний матеріал

Розглянемо математичну модель визначення оптимального плану розподілу й відповідних оптимальних маршрутів руху виїзних метрологічних груп за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки, яка слідує із моделі [5] для випадку недостатньої кількості коштів на проведення метрологічного обслуговування ЗВТВП:

$$\max_{\{S_k\}} \sum_{i \in S_k} \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$S_{k_1} \cap S_{k_2} = \emptyset; \quad k_1 \neq k_2; \quad \bigcup_{k=1}^K S_k \subseteq M;$$

$$C_{MO} = \sum_{i=2}^I \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C,$$

де  $(M, N)$  - транспортна мережа щодо дислокації військових частин та підрозділів;

$M = \{1, 2, \dots, I\}$  - множина вузлів, що відповідають місцям дислокації ВМГ та військових частин (підрозділів), де вузол за номером 1 відповідає місцю дислокації ВМГ;

$N$  - множина дуг транспортної мережі, які пов'язують між собою вузли;

$r_{ij}$ ;  $i = \overline{1, I}$ ;  $j = \overline{1, J}$  - кількість ЗВТВП  $j$ -го типу  $i$ -ої військової частини (підрозділу) у регіоні, що підлягає метрологічному обслуговуванню (якщо ЗВТВП  $j$ -го типу не підлягає метрологічному обслуговуванню, то  $r_{ij} = 0$ );

$t_j$ ;  $j = \overline{1, J}$  - усереднена норма часу на метрологічне обслуговування одного ЗВТВП  $j$ -го типу;

$c_j$ ;  $j = \overline{1, J}$  - усереднена вартість метрологічного обслуговування одиниці ЗВТВП  $j$ -го типу;

$c_0$  - тариф на транспортні витрати ВМГ;

$C$  - виділені сумарні кошти на метрологічне обслуговування ЗВТВП усіх військових частин (підрозділів);

$K$  - кількість ВМГ у регіоні;

$$S_k = \{1, i_1^{(k)}, i_2^{(k)}, \dots, i_{n_k}^{(k)}, 1\} \quad - \text{впорядкований}$$

маршрут метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні для  $k$ -ої ВМГ (впорядкована множина вузлів транспортної мережі  $(M, N)$ , що відповідають місцям дислокації військових частин (підрозділів));

$l(s_k)$ ;  $k = \overline{1, K}$  - довжина (час пересування) за маршрутом  $S_k$  для  $k$ -ої ВМГ;

$\tau_{ik}$ ;  $i = \overline{1, I}$ ;  $k = \overline{1, J}$  - час руху ВМГ із  $i$ -ої військової частини (підрозділу) до  $n$ -ої.

Обмеження щодо обсягів часу ВМГ на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин та підрозділів, відповідно до обраних маршрутів руху  $S_k$ ;  $k = \overline{1, K}$  зводиться до рівності, що визначає фонди часу метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин та підрозділів

$$\sum_{i \in S_k} \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j = T_k^{\Phi}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

тому немає сенсу включати ці обмеження до математичної моделі (1).

Величина  $C_{MO}$  в виразі (1), як і в статті [6] визначає необхідну сумарну вартість потрібного метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні, а нерівність

$$C_{MO} = \sum_{i=1}^I r_{ij} c_j \leq C \quad (3)$$

визначає, що на метрологічне забезпечення ЗВТВП усіх військових частин (підрозділів) не вистачає коштів, що є в наявності.

Розв'язання задачі (1) будемо шукати як вирішення наступної трьохетапної задачі.

На першому етапі пропонується вирішувати задачу пошуку максимальної кількості військових частин (підрозділів), метрологічне забезпечення ЗВТВП яких необхідно провести у повному обсязі у відповідності із замовленням, враховуючи обмеження на сумарну вартість метрологічного забезпечення ЗВТВП за наступною математичною моделлю:

$$|N| \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$N = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \subset \{2, 3, \dots, I\}; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i \in Q_k} \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C; \quad (6)$$

$$\bigcup_{k=1}^K Q_k = N; \tag{7}$$

$$Q_{k_1} \cap Q_{k_2} = \emptyset; \quad k_1 \neq k_2, \tag{8}$$

де  $N$  - множина вузлів дислокації військових частин (підрозділів) в регіоні, де здійснюється метрологічне обслуговування ЗВТВП у повному обсязі у відповідності із замовленням;

$|N|$  - кількість військових частин (підрозділів) в регіоні, де здійснено метрологічне обслуговування ЗВТВП;

$Q_k; k = \overline{1, K}$  - множина вузлів дислокації військових частин (підрозділів) в регіоні, що підлягають метрологічному обслуговуванню ЗВТВП  $k$ -ою ВМГ;

співвідношення (6) обмежує сумарні вартісні витрати на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів);

співвідношення (7) означає, що метрологічному обслуговуванню ЗВТВП підлягає кожна військова частина (підрозділ) із множини  $N$ ;

співвідношення (8) означає, що кожна військова частина (підрозділ) підлягає метрологічному обслуговуванню ЗВТВП однією ВМГ.

На другому етапі вирішується задача оптимального розподілу ВМГ за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) щодо визначеної на першому етапі множини військових частин (підрозділів). Ця задача описується такою математичною моделлю:

$$\max_{1 \leq k \leq K} \sum_{i \in P_k} \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j \rightarrow \min; \tag{9}$$

$$\bigcup_{k=1}^K P_k = N; \quad P_{k_1} \cap P_{k_2} = \emptyset; \quad k_1 \neq k_2.$$

Необхідність рішення цієї задачі полягає у тому, що визначений на першому етапі розподіл ВМГ не є оптимальним за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів).

На третьому етапі для кожної ВМГ, щодо визначеної при розв'язанні задачі (9), множини вузлів дислокації військових частин (підрозділів)  $P_k^*$  вирішуються задача пошуку найкоротшого за часом замкненого шляху  $S_k$ , котрий починається та закінчується в вузлі 1 й проходить скрізь усі вузли дислокації військових частин (підрозділів) тільки один раз:

$$l(S_k) = \tau_{1, i_{1k}} + \tau_{i_{1k}, i_{2k}} + \dots + \tau_{i_{n_k k}, 1} \rightarrow \min; \tag{10}$$

$$S_k = [1, i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{n_k k}, 1] \in L(P_k^*); \quad k = \overline{1, K}.$$

Такі замкнені шляхи  $S_k$  мають назву гамільтонових контурів [7]. Через  $L(P_k^*)$  позначено множи-

ну усіх гамільтонових контурів для вузлів із множиною  $P_k^*$ , що починаються й закінчуються в вузлі 1.

Для розв'язання лінійної задачі цілочисельного програмування (4)-(8) перетворимо її наступним чином. Введемо набір змінних  $y_{ki}$ , де  $y_{ki} = 1$ , якщо  $k$ -та ВМГ призначається здійснювати метрологічне обслуговування ЗВТВП  $i$ -ої військової частини (підрозділу) у регіоні, а  $y_{ki} = 0$ , якщо  $k$ -та ВМГ не призначається здійснювати метрологічне обслуговування ЗВТВП  $i$ -ої військової частини (підрозділу) у регіоні. Відтоді сумарна кількість військових частин (підрозділів), що підлягають метрологічному обслуговуванню ЗВТВП (4) дорівнює

$$|N| = \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}, \tag{11}$$

обмеження на сумарні витрати (6) приймає такий вигляд:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki} \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C,$$

обмеження (7), (8) замінюються на:

$$\sum_{k=1}^K y_{ki} \leq 1; \quad i = \overline{1, I}; \tag{12}$$

$$y_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i = \overline{1, I}. \tag{13}$$

Таким чином, математична модель (4)-(8) приймає такий вигляд:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki} \rightarrow \max; \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki} \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ki} \leq 1; \quad i = \overline{2, I};$$

$$y_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i = \overline{2, I}.$$

Оптимальне рішення задачі має такий вигляд:

$$Y^* = \|y_{ki}^*\|_{K, I-1} - \text{оптимальний розподіл ВМГ}$$

по військовим частинам (підрозділам) у регіоні за критерієм максимуму їх кількості;

$N^* = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  - множина вузлів дислокації військових частин (підрозділів), що підлягають метрологічному обслуговуванню ЗВТВП;

$$C_{MO}^* = \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j - \text{сумарна вартість}$$

метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів).

Для розв'язання задачі (9) другого етапу, перетворимо її в задачу математичного програмування таким чином [6]:

$$T_{MO} = \max_{1 \leq k \leq K} \sum_{i \in N^*} x_{ki} \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j \rightarrow \min ;$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ki} = 1; \quad i \in N^*; \quad (15)$$

$$x_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i \in N^*,$$

яка перетворюється в лінійну задачу цілочисельного програмування [6]:

$$T_{MO} \rightarrow \min;$$

$$\sum_{i \in N^*} x_{ki} \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j \leq T_{MO}; \quad k = \overline{1, K}; \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ki} = 1; \quad i \in N^*;$$

$$x_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i \in N^*,$$

де  $x_{ki} = 1$ , якщо  $k$  – та ВМГ здійснює метрологічне обслуговування ЗВТВП  $i$  – ої військової частини (підрозділу) та  $x_{ki} = 0$ , якщо  $k$  – та ВМГ не здійснює метрологічне обслуговування ЗВТВП  $i$  – ої військової частини (підрозділу).

У результаті вирішення задачі (16) отримуємо:

$$X^* = \left\| x_{ki}^* \right\|_{K, |N^*|} - \text{оптимальний розподіл ВМГ}$$

щодо метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні за критерієм мінімуму часу обслуговування;

$T_{MO}^*$  – мінімальний час метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні за розрахунковий період;

$$T_k^* = \sum_{i \in N^*} x_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j; \quad k = \overline{1, K} - \text{ фонд часу}$$

метрологічного обслуговування ЗВТВП відповідних військових частин (підрозділів) у регіоні, що обслуговуються  $k$  – ою ВМГ за оптимальним планом розподілу  $X^*$ ;

$P_k^* = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_k}\}; k = \overline{1, K}$  – множина військових частин (підрозділів), що обслуговуються  $k$ -ою ВМГ, де  $x_{kp_1}^* = x_{kp_2}^* = \dots = x_{k, p_{n_k}}^* = 1$ .

На третьому етапі розв'язується задача (10) для  $k$ -ої ВМГ й відповідної множини  $P_k^*$  за методом гілок та границь [7]. Оптимальне рішення задачі (10) визначає:

$S_k^*; k = \overline{1, K}$  – оптимальний за часом (й відповідно за вартістю) замкнений маршрут щодо  $k$ -ої ВМГ;

$I_k^* = 1(S_k^*); k = \overline{1, K}$  – мінімальний час пересування  $k$ -ої ВМГ;

$c_0 I_k^*; k = \overline{1, K}$  – мінімальна вартість транспортних витрат  $k$ -ої ВМГ.

Таким чином, вирішення трьохетапної задачі (14), (16), (10) дозволить визначити:

$$X^* = \left\| x_{ki}^* \right\|_{K, I-1} - \text{оптимальний розподіл ВМГ}$$

щодо метрологічного забезпечення ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні за критерієм мінімуму часу обслуговування;

$S_k^*; k = \overline{1, K}$  – оптимальний замкнений маршрут щодо  $k$ -ої ВМГ для визначеного оптимального плану розподілу  $X^*$ ;

$T_3^* = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k^* + I_k^*\}$  – оптимальний загальний час метрологічного обслуговування ЗВТВП та часові транспортні витрати ВМГ;

$$C_3^* = C_{MO}^* + c_0 \sum_{k=1}^K I_k^* - \text{загальні вартісні витрати}$$

метрологічного обслуговування ЗВТВП та пересування ВМГ за визначеним оптимальним планом розподілу  $X^*$  та оптимальних маршрутів руху  $S_k^*; k = \overline{1, K}$ .

**Зауваження 1.** Відмічається, що точка мінімуму цільової функції задачі (16) може бути не єдиною, тобто може існувати інша матриця призначень  $X^{**} = \left\| x_{ki}^{**} \right\|_{K, I-1}$ , на якій також досягається мінімум

цільової функції  $T_{MO}^*$ . Відтоді для цього рішення в задачі (10) може бути визначені інші оптимальні маршрути  $S_k^{**}; k = \overline{1, K}$  такі, що у загальному випадку може статися, що

$$T_3^{**} = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k^{**} + I_k^{**}\} \langle T_3^* = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k^* + I_k^*\}.$$

**Зауваження 2.** Можливо існування неоптимальної матриці призначень  $X' = \left\| x_{ki}' \right\|_{K, I-1}$  задачі (16),

для якої існують такі маршрути руху  $S_k'; k = \overline{1, K}$ , що

$$T_3' = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k' + I_k'\} \langle T_3^* = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k^* + I_k^*\}.$$

Таким чином, рішення  $X^*, T_3^*, C_3^*$  є квазіоптимальне, що не є суттєвим, так як транспортні витрати істотно менше часових витрат щодо метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні.

**Зауваження 3.** Не виключено, що за результатом вирішення трьохетапної задачі (14), (16), (10) отримаємо випадок, коли витрати на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні не більше виділених коштів

$$C_{MO}^* = \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C, \text{ загальні вартісні}$$

витрати метрологічного обслуговування ЗТВВП військових частин (підрозділів) у регіоні та пересування МГ до місць їх дислокації перевищують

$$C_3^* = C_{MO}^* + c_0 \sum_{k=1}^K l_k^* > C. \text{ У цьому випадку, перш за}$$

все, пропонується прорахувати отримане перебільшення коштів:  $\Delta = C_3^* - C$ , та здійснити вирішення

$$\text{трьохетапної задачі (14), (16), (10), де замість обмеження } \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C \text{ в (14) необхідно розг-$$

$$\text{лядати таке обмеження } \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j \leq C - \Delta.$$

Цю процедуру необхідно виконувати доти, доки не буде виконуватися нерівність  $C_3^* \leq C$ .

Процедура розв'язання трьохетапної задачі (14), (16), (10) має такий вигляд.

**Еман 1.** Визначення параметрів  $q_i, B$ :

$$q_i = \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j; \quad i = \overline{2, I}; \quad B := C.$$

**Еман 2.** Розв'язання задачі лінійного цілочисельного програмування (ЛЦП) (14):

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki} \rightarrow \max;$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I q_i y_{ki} \leq B; \quad \sum_{k=1}^K y_{ki} \leq 1; \quad i = \overline{2, I};$$

$$y_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i = \overline{2, I}.$$

**Еман 3.** Формування рішення задачі (14):

$$Y^* = \|y_{ki}^*\|_{K, I-1}; \quad N^* = \{i_1, i_2, \dots, i_n\};$$

$$C_{MO}^* = \sum_{k=1}^K \sum_{i=2}^I y_{ki}^* \sum_{j=1}^J r_{ij} c_j.$$

**Еман 4.** Визначення параметрів  $d_i$ :

$$d_i = \sum_{j=1}^J r_{ij} t_j; \quad i \in N^*.$$

**Еман 5.** Розв'язання задачі лінійного цілочисельного програмування (ЛЦП) (16):

$$T_{MO} \rightarrow \min;$$

$$\sum_{i \in N^*} d_i x_{ki} \leq T_{MO}; \quad k = \overline{1, K};$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ki} = 1; \quad i \in N^*;$$

$$x_{ki} \in \{0, 1\}; \quad k = \overline{1, K}; \quad i \in N^*.$$

**Еман 6.** Формування рішення задачі (16):

$$X^* = \|x_{ki}^*\|_{K, I-1}; \quad T_{MO}^* = \min_{\{X\}} T_{MO};$$

$$T_k^* = \sum_{i \in N^*} d_i x_{ki}^*; \quad k = \overline{1, K};$$

$$P_k^* = \{P_1, P_2, \dots, P_{n_k}\}; \quad k = \overline{1, K}.$$

**Еман 7.** Розв'язання задачі пошуку мінімального за часом гамільтонового шляху щодо кожної ВМГ:

$$l(s_k) = \tau_{1, i_{1k}} + \tau_{i_{1k}, i_{2k}} + \dots + \tau_{i_{n_k k}, 1} \rightarrow \min;$$

$$S_k = [1, i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{n_k k}, 1] \in L(P_k^*); \quad k = \overline{1, K}.$$

**Еман 8.** Формування рішення задачі (10):

$$S_k^* = [1, i_{1k}^*, i_{2k}^*, \dots, i_{n_k k}^*, 1]; \quad k = \overline{1, K};$$

$$l_k^* = \tau_{1, i_{1k}^*} + \tau_{i_{1k}^*, i_{2k}^*} + \dots + \tau_{i_{n_k k}^*, 1}; \quad k = \overline{1, K}.$$

**Еман 9.** Визначення сумарної вартості метрологічного обслуговування ЗТВВП та транспортних

$$\text{витрат } C_3^* = C_{MO}^* + c_0 \sum_{k=1}^K l_k^*.$$

**Еман 10.** Перевірка обмеження на сумарну вартість метрологічного обслуговування ЗТВВП та транспортні витрати, якщо  $C_3^* \leq C$ , то необхідно здійснити перехід на етап 12.

**Еман 11.** Визначення параметрів  $\Delta, B$ :

$$\Delta = C_3^* - C; \quad B := B - \Delta,$$

далі здійснюється перехід на етап 2.

**Еман 12.** Формування рішення трьохетапної задачі (14), (16), (10):

$$X^* = \|x_{ki}^*\|_{K, I-1}; \quad S_k^*; \quad k = \overline{1, K}; \quad T_{MO}^*; \quad T_k^*;$$

$$T_3^* = \max_{1 \leq k \leq K} \{T_k^* + l_k^*\}; \quad C_3^* = C_{MO}^* + c_0 \sum_{k=1}^K l_k^*.$$

Схема процедури наведена на рис. 1.

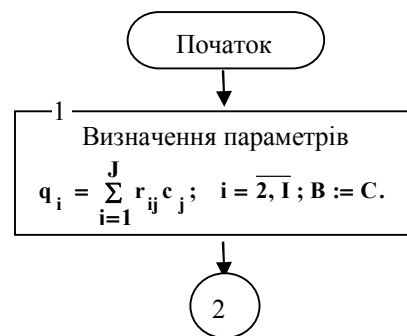


Рис. 1. Схема процедури 1

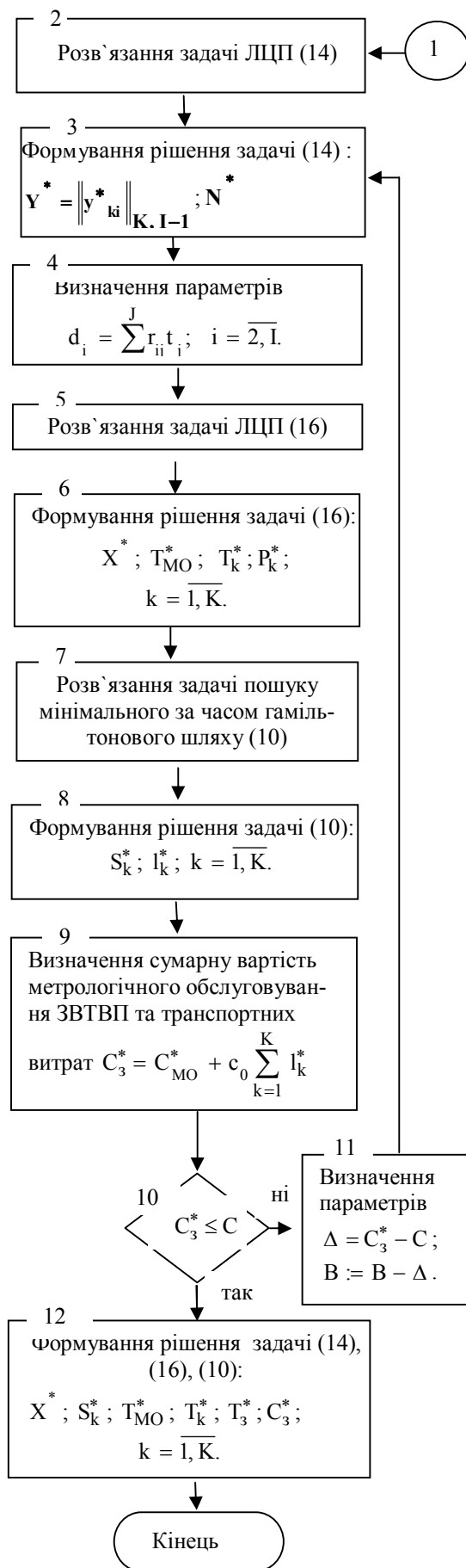


Рис. 1. Схема процедури 1 (закінчення)

Для ілюстрації запропонованого методу розв'язання поставленої задачі наведемо приклад її вирішення.

Вихідні дані наведені в табл. 1 – 6.

В табл. 7 – 11 надаються результати оптимального рішення задачі (14), результати оптимального рішення задачі (16) надаються в табл. 10 – 14, результати оптимального рішення задачі (10) надаються в табл. 15 – 18.

Остаточні результати вирішення трьохетапної задачі визначення загальної тривалості метрологічного обслуговування ЗВТВП і транспортних витрат часу, а також загальні витрати щодо метрологічного обслуговування ЗВТВП щодо військових частин (підрозділів) надані в табл. 17, 18.

Всі розрахунки здійснювалися в середовищі Excel [8].

Таблиця 1  
Матриця замовлень військових частин (підрозділів) щодо метрологічного обслуговування ЗВТВП за типами, R, од.

Типи \ в/ч	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	12	2	7	4	2	18	18	10	0	10	3
3	11	4	5	3	2	14	13	14	2	9	5
4	10	3	7	6	3	10	11	14	0	7	4
5	8	3	6	3	1	0	10	19	1	8	2
6	9	2	4	3	0	12	16	23	1	11	1
7	5	5	5	5	4	16	14	20	0	9	3
8	4	6	5	4	3	21	44	12	2	10	4

Таблиця 2  
Питомий час метрологічного обслуговування ЗВТВП за типами, t, час.

Типи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Час	4	8	5	6	3	1	4	1	2	1	5

Таблиця 3  
Питомі витрати метрологічного обслуговування ЗВТВП за типами, с, у.о.

Типи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
у.о	10	15	9	11	8	8	12	11	13	14	6

Таблиця 4  
Матриця найкоротших відстань, τ, час.

в/ч	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	2	1	3	4	2	5	3
2	2	0	1	3	5	1	6	5
3	1	1	0	3	4	2	7	4
4	3	3	3	0	5	1	4	1
5	4	5	4	5	0	5	1	3
6	2	1	2	1	5	0	7	2
7	5	5	7	4	1	7	0	2
8	3	5	4	1	3	2	2	0

Таблиця 5  
Тариф транспортування ВМГ, у.о.

Транспортний тариф	у.о.
c <sub>0</sub>	5

Таблиця 6

Сумарна вартість, у.о.

Сумарна вартість	у.о.
C	5000

Таблиця 7

Матриця X\* оптимального розподілу ВМГ за критерієм максимуму кількості військових частин ЗВТВП, що підлягають метрологічному обслуговуванню, одиниць

ВМГ \ В/ч	В/ч							
	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	1	0	
2	0	1	1	1	1	0	0	

Таблиця 8

Тривалість (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) та загальна тривалість (T<sub>МО</sub>) метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні 1 та 2 ВМГ, час.

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>МО</sub>
242	875	875

Таблиця 9

Вартість та сумарна вартість (C) метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні 1 (C<sub>1</sub>) та 2 (C<sub>2</sub>) ВМГ, у.о. (N – кількість військових частин)

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>МО</sub> = C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C	N
909	3243	4152	5000	5

Таблиця 10

Часові витрати ВМГ на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні, год.

В/ч	години	ВМГ
2	254	-
3	243	ВМГ 2
4	239	ВМГ 2
5	186	ВМГ 2
6	207	ВМГ 2
7	242	ВМГ 1
8	365	-
Σ	1736	ВМГ 1, 2

Таблиця 11

Вартісні витрати ВМГ на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні, у.о.

В/ч	години	ВМГ
2	901	-
3	868	ВМГ 2
4	786	ВМГ 2
5	686	ВМГ 2
6	903	ВМГ 2
7	909	ВМГ 1
8	1261	-
Σ	4152	ВМГ 1, 2

Таблиця 12

Матриця X\* оптимального розподілу ВМГ за критерієм мінімуму загального часу щодо метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні, одиниць

ВМГ \ В/ч	В/ч							
	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	1	1	1	0	0	
2	0	1	0	0	0	1	0	

Таблиця 13

Тривалість (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) та загальна тривалість (T<sub>МО</sub>) метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні 1 та 2 ВМГ, час.

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>МО</sub>
632	485	632

Таблиця 14

Вартість та сумарна вартість (C) метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні 1 (C<sub>1</sub>) та 2 (C<sub>2</sub>) ВМГ, у.о. (N – кількість військових частин)

C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>МО</sub> = C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub>	C	N
2375	1777	4152	5000	5

Таблиця 15

Оптимальний маршрут та тривалість обслуговування ВМГ 1 та ВМГ 2

№ ВМГ	Оптимальний маршрут	Тривалість
1	1 → 5 → 4 → 6 → 1	S <sub>1</sub> = 12
2	1 → 3 → 7 → 1	S <sub>2</sub> = 11

Таблиця 16

Транспортні витрати ВМГ 1, 2, у.о.

ВМГ 1: c <sub>1</sub> · l <sub>1</sub>	ВМГ 2: c <sub>2</sub> · l <sub>2</sub>
60	65

Таблиця 17

Загальна тривалість метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні із врахуванням транспортних витрат часу (ТВЧ) ВМГ 1 та ВМГ 2, годин

№ ВМГ	Загальна тривалість метрологічного обслуговування ЗВТВП із ТВЧ щодо ВМГ 1, 2	Загальна тривалість метрологічного обслуговування ЗВТВП із ТВЧ
1	632	632
2	485	

Таблиця 18

Загальні витрати на метрологічне обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів) у регіоні й транспортні витрати ВМГ 1 та ВМГ 2, у.о.

№ ВМГ	Загальні витрати на метрологічне обслуговування ЗВТВП
1	2435
2	1842
всього	4277

## Висновки

1. В статті запропоновано метод визначення оптимального плану розподілу виїзних метрологіч-

них груп й відповідних оптимальних маршрутів руху за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки в умовах обмеження сумарних витрат на метрологічне обслуговування військових частин та підрозділів й транспортних витрат.

2. Метод засновано на розв'язанні трьохетапної задачі оптимізації. На першому етапі вирішується задача пошуку максимальної кількості військових частин (підрозділів) метрологічного забезпечення ЗВТВП яких необхідно провести у повному обсязі у відповідності із замовленням, враховуючи обмеження на сумарну вартість метрологічного забезпечення ЗВТВП. На другому етапі вирішується задача оптимального розподілу ВМГ за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування ЗВТВП військових частин (підрозділів). На третьому етапі для кожної ВМГ визначається множина вузлів дислокації військових частин (підрозділів)

$R_k^*$  задачі пошуку найкоротшого за часом замкненого шляху  $S_k$ , що починається та закінчується в вузлі 1 й проходить скрізь усі вузли дислокації військових частин (підрозділів) тільки один раз.

3. Наведена процедура розв'язання трьохетапної задачі визначення оптимального плану розподілу виїзних метрологічних груп й відповідних оптимальних маршрутів руху за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки в умовах обмеження сумарних коштів на метрологічне обслуговування військових частин та підрозділів й транспортних витрат.

4. Надані результати вирішення трьохетапної задачі визначення оптимального плану розподілу виїзних метрологічних груп й відповідних оптимальних маршрутів руху за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування зразків озброєння та військової техніки в умовах обмеження

сумарних коштів на метрологічне обслуговування військових частин та підрозділів й транспортних витрат, які визначені за допомогою середовища Excel.

## Список літератури

1. Наказ заступника Міністра оборони з озброєння – начальника Озброєння ЗС України “Про затвердження Керівництва з організації та порядку експлуатації виміральної техніки у ЗС України” від 1.06.2001 № 79.
2. Наказ начальника Центрального управління метрології і стандартизації “Про затвердження Керівництва з організації виробничої діяльності військових метрологічних лабораторій в Міністерстві оборони України та Збройних Силах України” від 14.05.2007 № 2.
3. Кузнецов І.Б. Організація метрологічного забезпечення військ (сил). Ч. 1: навч. посіб. / І.Б. Кузнецов, П.М. Яблонський. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
4. Кузнецов І. Б. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко – К.: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2013. – 360 с.
5. Кононов В.Б. Математична модель задачі визначення оптимального плану розподілу й оптимальних маршрутів руху виїзної метрологічної групи за критерієм мінімуму загального часу метрологічного обслуговування / В.Б. Кононов, Ю.І. Шевяков, Д.А. Філістеев // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 3(39). – С. 111 – 113.
6. Метод визначення оптимального плану розподілу й відповідних оптимальних маршрутів руху виїзних метрологічних груп при метрологічному обслуговуванні військових частин та підрозділів / В.Б. Кононов, Ю.І. Шевяков, Д.А. Філістеев, В.В. Бурцева // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 4(40). – С. 61 – 67.
7. Моисеев М.К. Методы оптимизации / М.К. Моисеев, Ш.П. Иванюков, Е.М. Столярова. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
8. Гельман В.Я. Решение математических задач средствами Excel / В.Я. Гельман. – М.: Питер, 2008. – 235 с.

Надійшла до редколегії 22.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.М. Більчук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ВЫЕЗДНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЯ СУММАРНЫХ ЗАТРАТ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

В.Б. Кононов, Ю.И. Шевяков, Д.А. Филистеев, В.В. Бурцева

*В статье предложен метод определения оптимального плана распределения и соответствующих оптимальных маршрутов движения выездных метрологических групп по критерию минимума общего времени метрологического обслуживания образцов вооружения и военной техники войск в условиях ограничения суммарных средств на метрологическое обслуживание войсковых частей и подразделений и транспортных расходов.*

**Ключевые слова:** вооружение и военная техника, метрологическое обслуживание, оптимальный план распределения выездных метрологических групп, оптимальные маршруты движения.

## METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL DISTRIBUTION PLAN AND RELATED OPTIMAL ROUTE VISITING METROLOGY GROUP IN THE LIMITATIONS THE TOTAL COST OF METROLOGICAL SERVICES

V.B. Kononov, Y.I. Sheviakov, D.A. Filisteev, V.V. Burtceva

*This paper proposes a method for determining the optimal distribution plan and the corresponding optimal routes of visiting metrology groups on the criterion of minimum total time of metrological service of weapons and military equipment of troops in conditions of limited total assets on the metrological service of military units and divisions and transport costs.*

**Keywords:** arms and military equipment, metrological service, the optimal plan distribution of field metrology groups, the best routes.