

УДК 621.797

О. О. Морозов

## ФОРМУВАННЯ ПЛАНУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЕХНІКИ

Представлено алгоритм рішення задачі формування оптимального плану обслуговування парку різнотипних зразків техніки. Запропоновано комбінаторний алгоритм послідовних ітерацій оптимізації первісного плану.

*К л ю ч о в і с л о в а:* обслуговування техніки, календарне планування, план обслуговування, оптимізація плану.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення працездатності та справності техніки протягом усього строку її служби широко використовується планово-попереджувальна система технічного обслуговування і ремонту. Вона припускає проведення комплексу організаційно-технічних заходів щодо технічного обслуговування і (або) ремонту (далі – обслуговування) техніки [1]. У організації обслуговування виникають задачі, пов'язані із плануванням проведення згаданих заходів. Такою задачею є прийняття рішень стосовно своєчасного обслуговування парку техніки у відведений період планування, регламентований існуючими нормативами. Результатом рішення є план обслуговування. Однією з вимог до плану є забезпечення своєчасного обслуговування техніки органом обслуговування техніки, наприклад, ремонтним органом.

Велика кількість і типаж техніки, обмежені виробничі можливості органів обслуговування можуть призводити до нерівномірного завантаження такого органу і, як результат, не виконання плану обслуговування. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є оптимізація плану обслуговування.

Оптимізація плану, як правило, припускає мінімізацію середньої вартості обслуговування за одиницю часу з метою рівномірного використання наявних ресурсів (наприклад, трудомісткості в одиницях часу).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задачам формування планів обслуговування техніки, що ґрунтуються на планово-попереджувальній системі обслуговування, присвячена достатня кількість наукових праць [2–6]. Їх аналіз показує, що у формуванні таких планів не завжди враховується система обслуговування техніки [2, 4, 6], що істотно утруднює практичне застосування одержуваних рішень. У оптимізації планів обслуговування не враховуються виробничі можливості органів обслуговування техніки, наслідком чого є формування “ідеальних” планів [3, 5]. Очевидно, що для одержання рішень, які можна реалізувати на практиці, при формуванні планів обслуговування необхідно враховувати і прийняту систему обслуговування техніки, і можливості органів обслуговування. Тобто необхідно формувати плани обслуговування техніки таким чином, щоб трудомісткість цих робіт була оптимальною щодо потужності обслуговуючих органів у кожний планований період.

**Мета статті** – розроблення алгоритму і вибір методу рішення задачі формування оптимального плану обслуговування парку техніки за планово-попереджувальної системи обслуговування.

**Виклад основного матеріалу.** Задача обслуговування техніки за планово-попереджувальної системи обслуговування полягає у плановому обслуговуванні через нормативно задані інтервали часу (рис. 1).

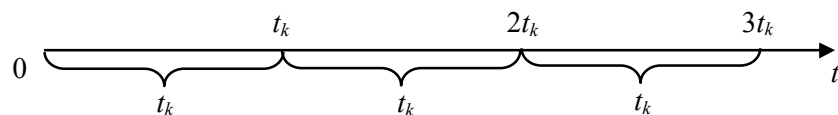


Рис. 1. Обслуговування техніки через інтервали рівної тривалості

Жорстко задані терміни не дозволяють рівномірно розподілити трудовитрати на весь планований період, що призводить до нерівномірного завантаження органів обслуговування в окремі періоди часу. Тому спочатку корисно враховувати інтервал, в межах якого можна варіювати строками обслуговування.

За припущення, що планове обслуговування зразків техніки  $k$ -го типу можна почати раніше на величину  $\Delta t_{1k}$  або пізніше на величину  $\Delta t_{2k}$ , початок такого обслуговування можна вибрати в інтервалі

$$i \times t_k^H - \Delta t_{1k} \leq t'_{kz} \leq i \times t_k^H + \Delta t_{2k}, \quad k = \overline{1, M}, \quad (1)$$

де  $M$  – кількість типів зразків техніки, що підлягають обслуговуванню в календарному плануванні;  $t_k^H$  – нормативний строк експлуатації зразка техніки  $k$ -го типу;  $\Delta t_{1k}$ ,  $\Delta t_{2k}$  – граничний допуск на зменшення (збільшення) строку обслуговування відповідно;  $t'_{kz}$  – строк експлуатації зразка техніки  $k$ -го типу до  $z$ -го обслуговування для скорегованого плану.

У цьому випадку можлива оптимізація вихідного плану, що полягає у виборі величин  $\tau_{kz}$ , які визначають строк обслуговування від початку планового періоду:

$$\tau_{kz} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } z = 0; \\ \tau_{k, z-1} + t'_{kz}, & \text{якщо } z > 0. \end{cases} \quad (2)$$

Тоді обслуговування здійснюється через вибрані інтервали  $\tau_{kz}$ , які оптимізують процес обслуговування за заданими критеріями (рис. 2).

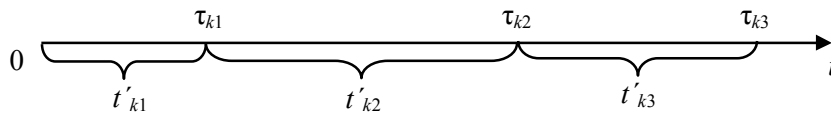


Рис. 2. Обслуговування техніки через інтервали різної тривалості

Нехай

$$A = \|a_{ik}^n\|, \quad i = \overline{1, m_k}; \quad (3)$$

$$a_{ik}^n = \begin{cases} 1, & \text{mod}_{t_k} (n + \mu_{ik} - 1) = 0; \\ 0, & \text{mod}_{t_k} (n + \mu_{ik} - 1) \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

вихідний план (до оптимізації) обслуговування техніки, де  $a_{ik}^n$  – планове обслуговування  $i$ -го зразка техніки  $k$ -го типу в  $n$ -й інтервал обслуговування;  $m_k$  – кількість зразків техніки  $k$ -го типу;  $\mu_{ik}$  – час експлуатації  $i$ -го зразка техніки  $k$ -го типу на початок планового періоду.

Якщо  $a_{ik}^n = 1$ , то це означає, що  $i$ -й зразок техніки  $k$ -го типу повинен бути обслужений в одиницю планового періоду  $n = \overline{1, N}$ . За одиницю планового періоду (ОПП) можна приймати тиждень, місяць, квартал і т. п.

Однак цей план не є оптимальним, тому що трудомісткості  $V_n$  у кожному  $n$ -ту ОПП, які розраховуються за формулою

$$V_n = \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} a_{ik}^n, \quad (5)$$

де  $C_k$  – трудомісткість обслуговування однієї одиниці техніки  $k$ -го типу, можуть значно відрізнятися від середньої трудомісткості обслуговування  $\bar{V}$  за весь плановий період.

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} a_{ik}^n. \quad (6)$$

Задача оптимізації полягає у формуванні нового плану

$$B = \|b_{ik}^n\|. \quad (7)$$

Трудомісткість у кожний період часу  $V'_n$ , відповідно до нового плану обслуговування, обчислюється за формулою

$$V'_n = \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} b_{ik}^n. \quad (8)$$

У виразі (7)

$$b_{ik}^n = \begin{cases} 1, & \text{якщо планується обслуговування;} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (9)$$

Введемо змінну булевого типу:

$$x_{ik}^{n \rightarrow j} \in [0, 1]. \quad (10)$$

Якщо змінна  $x_{ik}^{n \rightarrow j}$  дорівнює одиниці, то обслуговування  $i$ -го зразка техніки  $k$ -го типу переноситься з  $n$ -ї одиниці планового періоду на  $j$ -ту. При цьому має виконуватися співвідношення

$$\sum_{j=J_k^{(1)n}}^{J_k^{(2)n}} x_{ik}^{n \rightarrow j} = \begin{cases} a_{ik}^n, & \text{якщо } n \leq t_k, \\ S_k^{(2)n} \sum_{s=S_k^{(1)n}}^{S_k^{(2)n}} x_{ik}^{s \rightarrow (n-s)}, & \text{якщо } n > t_k, \end{cases} \quad (11)$$

де  $k = \overline{1, M}$ ,  $J_k^{(1)n} = \max(n - \Delta t_{1k}, 1)$ ;  $J_k^{(2)n} = \min(n + \Delta t_{2k}, N)$ ;  $S_k^{(1)n} = \max(n - \Delta t_{1k} - t_k, 1)$ ;  $S_k^{(2)n} = (n + \Delta t_{1k} - t_k)$ .

Співвідношення (11) отримане з наступних міркувань. Значення елементів  $a_{ik}^p$  та  $a_{ik}^{p+t_k}$  збігаються. Якщо обслуговування переноситься з  $p$ -ї ОПП на  $q$ -ту, то варто передбачити перенесення обслуговування з кожної  $p + j \times t_k$  на  $q + j \times t_k$  одиницю планового періоду. Якщо  $n > t_k$ , то враховуємо можливість обслуговування зразка техніки в ОПП  $n - t_k$ . Тобто, якщо у  $n$ -й ОПП вже заплановане обслуговування, то його можна перенести на більш ранній або пізній час. Фактично перенесення обслуговування можливе тільки в тому випадку, коли права частина в рівнянні (11) дорівнює одиниці.

Якщо змінні у виразі (10) визначені і задовольняють умови (11), то елементи матриці (7) можна визначити як

$$b_{ik}^n = \sum_{t=T_k^{(1)n}}^{T_k^{(2)n}} x_{ik}^{tn}, \quad (12)$$

тобто врахувати всі переноси на ОПП  $n$ , де

$$T_k^{(1)n} = \max(n - \Delta t_{2k}, 1);$$

$$T_k^{(2)n} = \min(n + \Delta t_{1k}, N).$$

Як критерій оптимізації візьмемо суму квадратів відхилень трудомісткості у  $n$ -й ОПП (8) від середньої трудомісткості (6), помноженої на коефіцієнт корегування [2]:

$$F(B) = \sum_{n=1}^N \left( \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} b_{ik}^n - r_n \cdot \bar{V} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (13)$$

де  $r_n$  – коефіцієнт корегування трудомісткості,  $1 \geq r_n \geq 0$ .

Підставляючи у вираз (13) замість  $b_{ik}^n$  їх значення за формулою (12), одержуємо:

$$F(X) = \sum_{n=1}^N \left( \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} \sum_{t=T_k^{(1)n}}^{T_k^{(2)n}} x_{ik}^{tn} - r_n \cdot \bar{V} \right)^2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

У виразі (14)  $X$  – матриця змінних розглянутої задачі:

$$X = \|x_{ik}^{nj}\|, \quad (15)$$

де  $k = \overline{1, M}$ ,  $i = \overline{1, m_k}$ ,  $n = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{J_k^{(1)n}, J_k^{(2)n}}$ .

Таким чином, вирази (11), (14) і (15) – це задача цілочисельного програмування з булевими змінними і квадратичною функцією цілі [7].

З огляду на особливості даної задачі, пропонується комбінаторний метод прямого перегляду вихідного плану (3). Кожний тип зразка техніки переглядається окремо з урахуванням результатів перегляду попередніх типів. Перегляд починається з першої ОПП періоду планування. Так, якщо у

$n$ -й ОПП поточна трудомісткість за всіма типами зразків техніки менше (більше) величини  $\bar{V} \cdot r_n$ , то відбувається скорочення або подовження строків обслуговування.

Перегляд наступного типу зразка техніки доцільно починати з того, у якого величина  $u_k = (\Delta t_{1k} + \Delta t_{2k}) / C_k$  найменша для зразків техніки, що залишилися. У подальшому вважатимемо, що рядки матриці (3) упорядковані за величиною  $u_k$  у порядку зростання.

Відзначимо, що значення елементів  $a_{ik}^n$  рядка матриці (3) повторюються з періодом  $t_k$ , тобто  $a_{ik}^n = a_{ik}^{n+\ell k}$ . Отже, якщо ми переносимо обслуговування з ОПП  $n$  на ОПП  $j$ , то для  $p = 0, (N-1)$  виконуватиметься умова

$$b_{ik}^s = \begin{cases} 0, & \text{для } s = n + pt_k, \\ 1, & \text{для } s = j + pt_k. \end{cases}$$

Такий метод дозволяє здійснити пошук оптимального рішення в режимі діалогу, задавши певне число ітерацій для послідовної оптимізації.

Алгоритм пошуку оптимального рішення, що реалізує даний комбінаторний підхід, буде містити такі операції.

1. Обчислюються трудомісткість обслуговування зразків техніки в кожній ОПП і середня трудомісткість  $\bar{V}$  за планом (3):

$$V_n := \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} a_{ik}^n, \quad n = \overline{1, N};$$

$$\bar{V} := \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n.$$

Елементом матриці (7) привласнюються початкові значення  $b_{ik}^n := a_{ik}^n$ , а величинам (10) значення

$$x_{ik}^{np} := \begin{cases} a_{ik}^n, & \text{якщо } p = n, \\ 0, & \text{якщо } p \neq n. \end{cases}$$

2. Виконується п. 3, змінюючи індекс  $k$  від 1 до  $M$ . Наприкінці здійснюється перехід до п. 11.

3. Виконується п. 4, змінюючи індекс  $n$  від 1 до  $N-1$ .

4. Обчислюються величини  $s$  та  $s'$ :

$$s := V_{cp} \cdot r_n / C_k,$$

$$s' := \text{mod}_{C_k}(\bar{V} \cdot r_n).$$

Тут  $\bar{V} \cdot r_n$  – планова середня трудомісткість у  $n$ -й ОПП. Потім генерується випадкове число  $\alpha$  за рівномірним законом в інтервалі  $(0,1)$ ; обчислюється величина

$$V_\alpha := \begin{cases} s' C_k, & \text{якщо } \alpha > (s - s'), \\ (s' + 1) \cdot C_k, & \text{якщо } \alpha \leq (s - s') \end{cases}$$

для визначення різниці між середньою планованою трудомісткістю в ОПП  $n$  і поточною трудомісткістю  $w := V_\alpha \cdot r_n - V_n$ .

Здійснюється перехід до  $\begin{cases} \text{п.3, якщо } |w| < C_k \text{ (вибір наступного } n), \\ \text{п.5, якщо } w > 0, \text{ (скорочення термінів обслуговування),} \\ \text{п.8, якщо } w \leq 0 \text{ (подовження термінів обслуговування).} \end{cases}$

5. Виконується п. 6, змінюючи  $j := 1, (1), \min\{\Delta t_{1k}, N - n\}$ . Тут запис виду  $q := q_1, (\Delta q), q_2$  означає, що індекс  $q$  змінюється з кроком  $\Delta q$  від  $q_1$  до  $q_2$ .

6. Виконується п. 7, змінюючи індекс  $i := 1, (1), m_k$ .

7. Якщо  $b_{ik}^n = 1$  або  $b_{ik}^{n+j} = 0$ , то здійснюється перехід до п. 6.

Змінюючи  $\lambda := n, (t_k), N$ , виконується  $\begin{cases} b_{ik}^\lambda := 1, \\ V_\lambda := V_\lambda + C_k. \end{cases}$

$$\text{Змінюючи } \lambda := n + j, (t_k), N, \text{ виконується } \begin{cases} x_{ik}^{\lambda \rightarrow \lambda} := 0, \\ x_{ik}^{\lambda \rightarrow (\lambda-j)} := 1, \\ b_{ik}^{\lambda} := 0, \\ V_{\lambda} := V_{\lambda} - C_k. \end{cases}$$

Обчислюється  $d := w - C_k$ . Якщо  $d < C_k$ , то здійснюється перехід до п. 3, інакше виконується  $w := d$ .

8. Виконується п. 9, змінюючи індекс  $i : i := 1, (1), m_k$ .

9. Виконується п. 10, змінюючи індекс  $j : j := 1, (1), \min \{ \Delta t_{2k}, N - n \}$ .

10. Якщо  $b_{ik}^n = 0$ , то здійснюється перехід до п. 8, а якщо  $x_{ik}^{n \rightarrow (n+j-1)} = 0$ , то здійснюється перехід до п. 9, інакше  $d := w + C_k$ .

$$\text{Змінюючи } \lambda := n + 1, (t_k), N, \text{ виконується } \begin{cases} x_{ik}^{\lambda \rightarrow (\lambda+j)} := 1, \\ b_{ik}^{\lambda} := 1, \\ V_{\lambda} := V_{\lambda} + C_k. \end{cases}$$

$$\text{Змінюючи } \lambda := n, (t_k), N, \text{ виконується } \begin{cases} x_{ik}^{\lambda \rightarrow (\lambda-1)} := 0, \\ b_{ik}^{\lambda} := 0, \\ V_{\lambda} := V_{\lambda} - C_k. \end{cases}$$

Якщо  $d < C_k$ , то здійснюється перехід до п. 3, інакше виконується  $w := d$ .

11. Кінець.

Розглянутий алгоритм оптимізації плану обслуговування припускає низку модифікацій. Наприклад, можна задати певну кількість ітерацій і повторити алгоритм задану кількість разів, запам'ятовуючи на кожній ітерації найкраще рішення з тих, що отримані раніше. Таким чином, буде вибрано найкраще рішення з деякої множини.

Критерієм для порівняння двох різних рішень може бути середнє квадратичне відхилення трудомісткості у кожній ОПП за всіма типами зразків техніки  $V_n$  від середньої планованої трудомісткості у цій самій ОПП  $\bar{V}$ :

$$\sigma^2(V_n) = \frac{1}{N} \left[ \sum_{n=1}^N \left( \sum_{k=1}^M C_k \sum_{i=1}^{m_k} b_{ik}^n - \bar{V} \cdot r_n \right)^2 \right].$$

Оскільки величинами  $r_n$  можна в деяких межах варіювати (наприклад, обслуговування технологічного устаткування обслуговуючих органів, відпустки персоналу та ін.), то це надає додаткові можливості для поліпшення вихідного плану (3) в ітераційному режимі.

### Висновки

Запропонований алгоритм рішення задачі формування оптимального плану обслуговування парку різнотипних зразків техніки дозволяє формувати плани з урахуванням виробничих можливостей обслуговуючих органів. Ітераційний алгоритм рішення шуканої задачі дозволяє одержувати варіанти рішень для різних значень змінних, які варіюють.

### Список використаних джерел

1. Барзилович, Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем [Текст] : учеб. пособие / Е. Ю. Барзилович. – М. : Высш. шк., 1982. – 231 с.
2. Ершов, М. С. Модели планирования ремонтов и замен промышленного электрооборудования [Текст] / М. С. Ершов. – М. : Радио и связь, 1995. – 65 с.

3. Григорьян, Т. А. Планирование на автотранспортном предприятии [Текст] / Т. А. Григорьян, И. И. Карамышева. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2008. – 138 с.
4. Алексеев, В. В. Модели планирования ремонтов и замен элементов в процессе жизненного цикла сложных технических систем [Текст] / В. В. Алексеев, И. В. Хоменко, Р. А. Прохорский // Вестник Воронежского института МВД РФ. – 2011. – № 3. – С. 46–51.
5. Шабельникова, А. Ю. Оптимизация графика планово-предупредительного ремонта энергооборудования промышленных предприятий [Текст] / А. Ю. Шабельникова, Д. А. Васильев, В. А. Иващенко // Вестник СГТУ. – 2014. – № 3 (76). – С. 104–108.
6. Алесинская, Т. В. Основы логистики. Общие вопросы логистического управления [Текст] / Т. В. Алесинская. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. – 121 с.
7. Сергиенко, И. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации [Текст] / И. В. Сергиенко. – К. : Наук. думка, 1988. – 472 с.

*Стаття надійшла до редакції 04.04.2016 р.*

**УДК 621.797**

**А. А. Морозов**

### **ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕХНИКИ**

*Представлен алгоритм решения задачи формирования оптимального плана обслуживания парка разнотипных образцов техники. Предложен комбинаторный алгоритм последовательных итераций оптимизации первоначального плана.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: обслуживание техники, календарное планирование, план обслуживания, оптимизация плана.*

**UDC 621.797**

**O. O. Morozov**

### **THE FORMATION OF THE MAINTENANCE PLAN OF MACHINERY**

*The algorithm of solving the problem of generating optimal maintenance plan Park different types of equipment. Proposed combinatorial algorithm for iterative optimization of the initial plan.*

*К e y w o r d s: equipment maintenance, scheduling, maintenance plan, optimization plan.*

**Морозов Александр Александрович** – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру службово-бойової діяльності НГУ Національної академії Національної гвардії України.