

УДК 623.004.67

**В.В. Щепетов**, д-р техн. наук, проф.  
**О.І. Щепотьєв**, канд. техн. наук, проф.  
**В.В. Варюхно**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.  
**В.Д. Гулевець**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

## МЕТОДИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ НАЗЕМНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОФІЛАКТИЧНИХ ЗАХОДІВ

НАУ, кафедра технології аеропортів  
 E-mail: itt@nau.ua

*Проведено аналіз стану парку наземного обладнання спецтранспорту аеропортів. Наведено пропозиції щодо вирішення проблеми технічного обслуговування і ремонту авіаційної техніки та оптимізації профілактичних заходів.*

*The analysis of the state of the ground equipment park of the airport special transport is conducted and suggestions in decision of problem of technical service and repair of this technique and optimization of prophylactic measures are given.*

### Постановка проблеми

Комплекс заходів щодо технічного обслуговування (ТО) і ремонту наземного обладнання (НО) умовно можна поділити на дві групи [1]:

- профілактичні роботи, пов'язані переважно з попередженням відмов;
- роботи з виявлення й усунення раптових відмов (потоканий ремонт).

Між цими групами робіт можуть існувати різні співвідношення залежно від прийнятого критерію оптимальності і стратегії в проведенні обслуговування. Але в будь-якому випадку основна вимога, запропонована в режимі обслуговування, – забезпечити максимальну ймовірність того, що в деякий довільний момент часу НО виявиться справною і виконає поставлене завдання. А витрати праці, часу і засобів для підтримки НО в справному стані будуть мінімальними.

Профілактичні роботи – це сукупність заходів, спрямованих на поліпшення робочих властивостей (безвідмовності) систем і елементів НО.

У першу чергу до них належать регулювання, налагодження, контрольні і мастильні операції, заміни елементів, що відпрацювали свій ресурс та ін. Основна мета профілактичних заходів полягає в попередженні зносу деталей НО, збереженні технічних характеристик у межах установлених допусків і забезпеченні безвідмовної роботи НО в міжпрофілактичних термінах.

### Аналіз досліджень

Залежно від призначення і складності НО профілактичні роботи можуть проводитися по досягненні:

- визначеного наробітку (години, цикли, километри та ін.);
- установлених календарних термінів;
- обох позначених показників.

Профілактику за наробітком призначають, як правило, для НО і технічних пристроїв, що працюють у тяжких умовах, а також протягом тривалого часу без перерв (АЦ-5,5-4320, АПА-5-4320, АПМ-90-130).

Профілактику за календарними термінами установлюють для НО і технічних пристроїв з малою інтенсивністю використання або тих, що знаходяться в режимі чергування, для попередження появи відмов, викликаних явищами старіння.

Комбіновану профілактику (за наробітком і календарними термінами) застосовують переважно для складного НО і технічних пристроїв з нерівномірною в часі інтенсивністю експлуатації.

За термінами проведення профілактики розрізняють дві основні стратегії: планову і змішану.

Планова стратегія полягає в проведенні профілактичних робіт чітко через визначений наробіток, незалежно від кількості відмовлень, що спостерігалися за цей час  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$  та ін. (рис. 1, а).

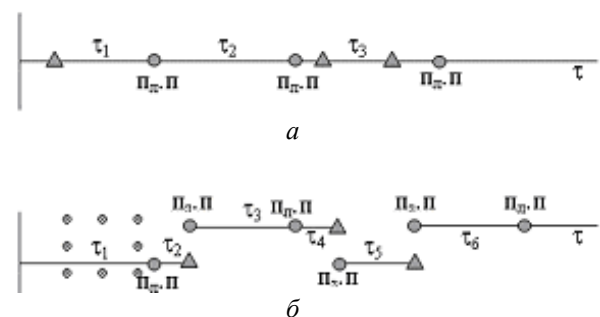


Рис. 1. Стратегія профілактик за термінами їх проведення:

а – планова стратегія; б – змішана стратегія;

● – профілактика; ▲ – випадкова відмова;  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6$  – планова і позапланова профілактики

При змішаній стратегії профілактичні роботи виконують або через визначений наробіток, якщо в міжпрофілактичний період не виникла відмова, або в момент усунення відмови, що виникла в міжпрофілактичний період. В останньому випадку термін проведення планової профілактики відраховується від моменту часу закінчення непланової профілактики (рис. 1, б).

Кожна стратегія має свої переваги і недоліки.

У випадку проведення планової стратегії терміни надходження НО на профілактику заздалегідь визначені. Це дозволяє чітко планувати роботу, забезпечувати рівномірне завантаження обслуговуючого персоналу, заздалегідь готувати комплекти запасних частин і агрегатів.

У той самий час вимушені простої НО через випадкові відмови в міжпрофілактичний період зовсім не використовують для виконання профілактичних робіт.

При змішаній стратегії вимушені простої НО у зв'язку з випадковими відмовами використовують для проведення профілактичних робіт.

У ряді випадків це дає відчутний ефект.

Однак терміни надходження спецмашин на профілактику точно не визначаються. Це створює труднощі в плануванні і підготовці виробництва. За характером робіт, які виконуються при профілактиках, розрізняють такі стратегії:

– профілактика з примусовою заміною агрегатів і вузлів;

– профілактика з заміною агрегатів і вузлів відносно їхнього технічного стану;

– профілактика з комбінованим методом заміни агрегатів і вузлів.

Усі ці види профілактик містять у собі операції контролю, регулювань, налагоджень і заміни агрегатів (рис. 2).

Основна відмінність полягає в обсягах проведення контролю технічного стану НО і обсягах заміни агрегатів.

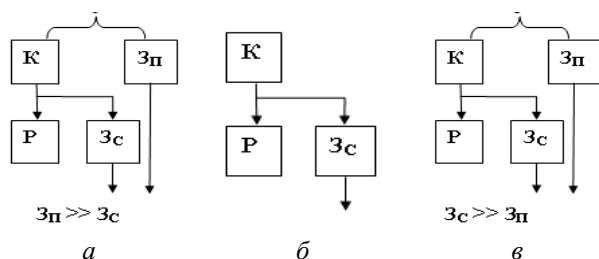


Рис. 2. Стратегії профілактик за характером робіт:

*a* – примусова заміна; *б* – заміна за технічним станом;

*в* – комбінований спосіб заміни;  
К – контроль; Р – регулювання; Зп – примусова заміна;  
Зс – заміна за станом

Так, при першій стратегії обсяги контролю, як правило, невеликі, заміна більшої частини агрегатів і вузлів відбувається в примусовому порядку в міру відпрацьовування ними встановлених ресурсів до ремонту, лише незначна частина заміни здійснюється за результатами контролю.

Друга стратегія характеризується застосуванням значних обсягів контрольних операцій технічного стану НО.

Часто таку стратегію називають профілактикою за параметром.

Обсяги регулювань, підналагоджень і заміни агрегатів визначаються тільки за результатами контролю.

Третя стратегія являє собою сполучення двох перших.

У цьому випадку одна частина агрегатів НО, насамперед, з тих, що не мають контрольованих параметрів і засобів контролю замінюється за відпрацьованим ресурсом, а інша частина, періодично контрольована при експлуатації – за фактичним технічним станом.

У практиці роботи військових автомобільних частин найбільш розповсюдженою є третя стратегія профілактики.

Проведення профілактичних заходів дає помітний результат тільки стосовно відмов, що підлягають профілактиці, тобто таким, яким можна запобігти в процесі профілактики [1]. Появі ж раптових відмов, які не підлягають профілактиці, профілактика запобігти не може. Рішення про запобігання ним приймається на підставі закону розподілу часу безвідмовної роботи елементів як функції часу наробітку.

Однак розподіл відмов на поступові, які підлягають профілактиці, і раптові, які не підлягають профілактиці, дуже умовне і пов'язується зі знанням закономірностей зміни технічного стану, профілактичними заходами і конструкцією НО. Багато раптових відмовлень є такими лише за формою виникнення, а їх передбачення і попередження залежать від рівня знань і наявних контрольних-діагностичних засобів. І, навпаки, деякі поступові відмовлення для *i*-го випадку є раптовими. Це свідчить лише про ймовірність досягнення граничного контрольованого параметра в заданий термін для деякої сукупності НО, їх агрегатів та вузлів.

Наприклад, якщо регулярно змащення шарнірних з'єднань не проводиться, то їх відмова або несправність через недолік змащення будуть такі самі раптові, як і втомлене руйнування деталі.

Обидва види технічного обслуговування і ремонту викликають простої НО в часі.

У будь-якому випадку, якщо вести облік часу простою, можна визначити середній час та інтенсивність проведення профілактичних заходів і усунення раптових відмов.

Інтенсивність обслуговування і ремонту є одним з параметрів, що характеризують ремонтпридатність НО.

**Виклад основного матеріалу**

Для більш точного уявлення про процес ТО і ремонту необхідно розглянути питання оптимізації профілактичних заходів.

При виборі оптимальних режимів профілактики НО виникають дві групи завдань:

- визначення оптимальної періодичності профілактики для окремих агрегатів, блоків, вузлів;
- зведення в групи профілактичних робіт на окремих агрегатах і вузлах в оптимальні форми регламенту для НО в цілому.

З літературних джерел і робіт, виконаних різними організаціями, випливає, що найбільш успішно вирішуються завдання першої групи. Вирішенню ж завдань другої групи не приділяється ще достатньої уваги.

Під час визначення оптимальної періодичності профілактики для окремих агрегатів, блоків, вузлів складного НО як оптимальний беруть різні критерії. Зокрема, оптимальний критерій встановлюють з умови досягнення максимальної надійності роботи агрегатів у міжпрофілактичний період  $P(t)_{м.п}$  при мінімальному значенні трудових витрат  $T_{т.о}$  на виконання профілактичних робіт і усунення відмов  $T_y$ .

Оптимальна періодичність профілактики для окремих агрегатів  $X_{opt}$  у цьому випадку визначається з умови досягнення максимального значення співвідношення

$$П = \left[ \frac{P(t)_{м.п}}{T_{т.о}} \right]_{\max} . \tag{1}$$

У ряді випадків максимальне значення співвідношення (1) може визначатися при встановленні відповідних обмежень. Наприклад, мінімум трудовитрат при заданому рівні надійності:

$$P(t)_{м.п} = P(t)_{зад},$$

$$T_{т.о} = \min$$

чи максимальна надійність при заданому рівні трудовитрат:

$$P(t)_{м.п} = \max,$$

$$T_{т.о} = T_{зад}.$$

Розгорнутий вираз для періодичності П має вигляд:

$$П = \frac{e^{-\lambda \eta x}}{T_n \frac{\tau_n}{x} + T_y \lambda \eta x} , \tag{2}$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов агрегату;  $X$  – періодичність профілактики, яка змінюється як безупинна величина в межах можливих мінімальних і максимальних значень;  $T_n$  – трудомісткість профілактичного обслуговування;  $\tau_n$  – діюча періодичність профілактики (до оптимізації);  $T_y$  – трудомісткість усунення раптових відмов у міжпрофілактичний період.

Частота прояву відмов у міжпрофілактичний період  $\eta$  визначається як відношення кількості відмов, що виявилися в міжпрофілактичний період, до загальної кількості відмов, зафіксованих за розглянутий період роботи машини.

Залежність  $\eta$  від  $X$  показано на рис. 3.

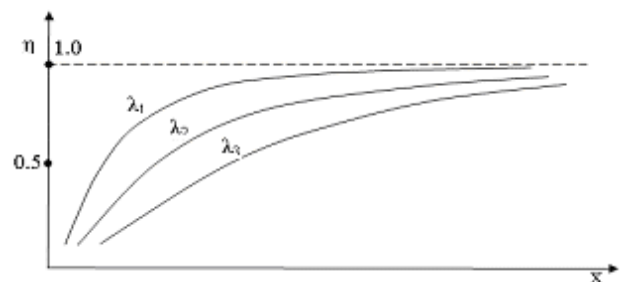


Рис. 3. Характер змін  $\eta$  від  $X$  при різних значеннях

Коефіцієнт  $\lambda_i$  визначається для кожного  $i$ -го вузла, агрегату, виходячи з досягнутих значень  $\eta_i$  при діючій періодичності  $\tau_{n_i}$ :

$$\lambda_i = \frac{\ln \frac{1}{1 - \eta_i}}{\tau_{n_i}} .$$

Для практичних розрахунків значення  $X$  та  $П_{\max}$  отримують у результаті побудови графіка  $П = f(X)$  у діапазоні змін  $X$ .

Наприклад, на рис. 3 показано подібні графіки для одного з виробів (табл. 1).

Таблиця 1

| Вихідні дані |          |                         |                      |                   |                   |                       |
|--------------|----------|-------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Варіант      | $\alpha$ | $\lambda, 1/\text{год}$ | $\tau_n, \text{год}$ | $T_y, \text{год}$ | $T_n, \text{год}$ | $T_{т.о}, \text{год}$ |
| 1            | 0,07     | $1 \cdot 10^{-3}$       | 100                  | 5                 | 10                | 10,45                 |
| 2            | 0,01     | $1 \cdot 10^{-2}$       | 100                  | 5                 | 10                | 13,16                 |

У загальному випадку для визначення максимуму виразу (2) необхідно взяти похідну від П відносно  $X$  та прирівняти до нуля (табл. 2, рис. 4).

У праці [2] запропоновано метод оптимізації періодичності ТО агрегатів і вузлів.

На підставі статистичних даних про відмову і несправності, отриманих у військових автомобільних частинах, складається ранжирований ряд чисел.

Таблиця 2

Результати розрахунку

| Варіант | X, год | P(t)    | T <sub>то</sub> за період x, | Π       |
|---------|--------|---------|------------------------------|---------|
| 1       | 10     | 0,995   | 100,03                       | 0,00994 |
|         | 100    | 0,91    | 10,45                        | 0,087   |
|         | 400    | 0,67    | 4,5                          | 0,15    |
|         | 1000   | 0,368   | 6,0                          | 0,0613  |
| 2       | 10     | 0,991   | 100,05                       | 0,0098  |
|         | 100    | 0,533   | 13,16                        | 0,0405  |
|         | 400    | 0,0196  | 22,15                        | 0,00008 |
|         | 1000   | 0,00005 | 51,0                         | 0,00000 |

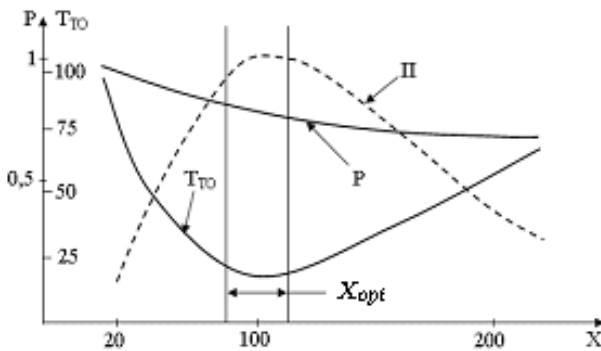


Рис. 4. Характер зміни величини P(t), T<sub>то</sub> відносно X

Користуючись розподілом Пуассона, визначають імовірність виявлення n відмов і несправностей агрегата за час X:

$$g(n) = \frac{(\lambda x)^n}{n!} e^{-\lambda x}$$

Потім будують графіки залежності g(n) від X (рис. 5).

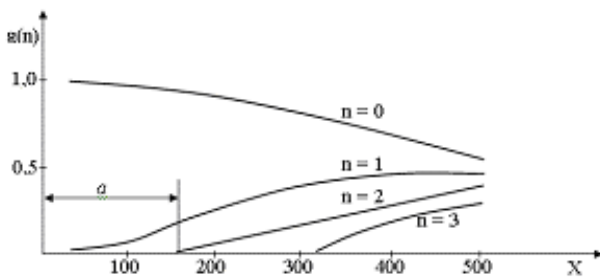


Рис. 5. Характер залежності g(n) = f(X) для X<sub>opt</sub> = 1/2 a

Користуючись графіками надійності агрегатів, визначають оптимальний період їхньої профілактики. Таким періодом буде медіана значення ранжированого ряду чисел, що розташовані по осі X у проміжку між нулем і перетином кривої g(n) = f(X) при n = 2 з віссю X.

За точку перетину беруть величину

$$q(n = 2) = 0,01,$$

або ця точка знаходиться екстраполяцією.

У цьому інтервалі часу буде виявлено не більш одного несправного агрегату, що припустимо.

Спосіб оптимізації термінів проведення профілактичних робіт, виходячи з закономірностей розвитку відмов агрегатів [3], полягає в тому, що при оптимальних термінах виконання профілактик підвищується ймовірність спільної події – виникнення несправності і не появи відмовлення P<sub>H,0</sub>(t).

Усунення несправностей у встановлений термін попереджає виникнення відмов.

Коли несправність передувє відмові, між значеннями часу виникнення несправностей і відмов існує ймовірна або функціональна залежність.

Імовірність виникнення несправності за невеликий відрізок часу (t, t + dt), що передувє початку проведення першої профілактики, дорівнює f<sub>1</sub>(t)dt.

Імовірність того, що від моменту часу t до початку проведення першої профілактики t<sub>e,1</sub> в технічному пристрої не виникає відмов, дорівнює 1 - F<sub>2</sub>(t<sub>e,1</sub> - t), де F<sub>2</sub>(t<sub>e,1</sub> - t) – імовірність виникнення відмови за час (t<sub>e,1</sub> - t).

У цьому випадку елемент імовірності dP<sub>H,0</sub>(t)

дорівнює добутку розглянутих імовірностей:

$$dP_{H,0}(t) = [1 - F_2(t_{e,1} - t)]f_1(t)dt$$

Виконавши розрахунки за всіма t від 0 до t<sub>e,1</sub>, отримаємо

$$P_{H,0}(t_{e,1}) = \int_0^{t_{e,1}} [1 - F_2(t_{e,1} - t)]f_2(t)dt \tag{3}$$

Оптимізацію термінів виконання профілактичних робіт рекомендується проводити за умови, що час виникнення несправностей t<sub>1</sub> і відмов t<sub>2</sub> розподілені за показниковим законом. Використання інших законів розподілу, у тому числі нормальної і рівномірної щільності, практично не впливає на кінцевий результат (відмінність у термінах профілактики може бути 10–15%).

Вираз (3) для показникового закону розподілу часу виникнення несправностей і відмов має вигляд:

$$P_{H,0}(t_{e,1}) = \int_0^{t_{e,1}} e^{-\lambda_2(t_{e,1}-t)} \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt$$

Оптимальний термін профілактики агрегату в загальному випадку визначають як найменший позитивний корінь рівняння:

$$\frac{dP_{H,0}(t_{e,1})}{dt_{e,1}} = 0.$$

Однак на практиці оптимальне значення t<sub>e,1</sub> знаходять із графіка P<sub>H,0</sub>(t<sub>e,1</sub>) = f(t) в діапазоні зміни t (рис. 6).

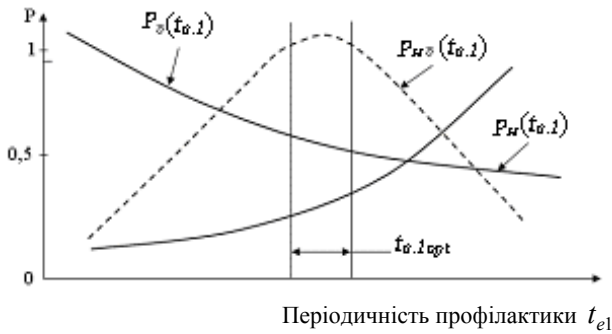


Рис. 6. Характер зміни величин  $P_{H,0}(t_{el}), P_0(t_{el}), P_H(t_{el})$  за  $t$

Користуючись будь-яким методом оптимізації, одержують незбіжні між собою терміни профілактики цілого ряду агрегатів і вузлів НО.

Реалізація отриманих результатів зажадала би організації безупинної профілактики. Тому навіть при відомих термінах профілактики кожного з елементів залишається невирішеним завдання вибору періодичності профілактики для НО в цілому.

Розглянемо спосіб вирішення цього завдання, запропонований Л.Б. Тальянкером.

Допускається, що всі роботи можна розбити на дві неперетинні підмножини  $M_1$  і  $M_2$ .

Для кожної  $i_1$ -ї роботи ( $i_1 \in M_1$ ) відомі прямі витрати  $y_{1,i}$  і призначена (максимально допустима) періодичність  $x_{1,i}$  ( $x_{1,1} < x_{1,2} < \dots < x_{1,n}$ ) (рис. 7).

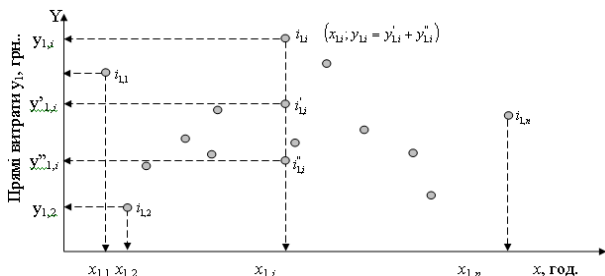


Рис. 7. Сукупність робіт підмножини  $M_1$

Для кожної  $i_2$ -ї роботи  $i_2 \in M_2$  відома детермінована функціональна залежність питомих витрат на ТО і ремонт від періодичності ТО:  $y_{2,i} = f(x_{2,i})$ . Усі функції  $f(x_{2,i})$  двічі безупинно диференційовані. Для кожної з них справедлива нерівність  $f''(x_{2,i}) > 0$ . Область значень функцій  $f(x_{2,i})$  не обмежена, відомі точки  $\tilde{x}_{2,i}$  ( $\tilde{x}_{2,1} < \tilde{x}_{2,2} < \dots < \tilde{x}_{2,n}$ ), в яких  $f'(x_{2,i}) = 0$ , і відповідні цим точкам значення  $y_{2,i}$  (рис. 8).

Нехай, крім того, відомі середній річний наробіток машини  $W_r$ , годинні збитки від простою  $y_n$  і середні простої при виконанні кожної  $i$ -ї роботи  $B_i$  ( $i \in M, M = M_1 \cup M_2$ ).

За такі умови річні витрати на ТО і ремонт будь-якої машини з урахуванням збитків від простоїв становлять  $Y$  гривень:

$$Y = \sum_{i \in M_1}^{n_1} y_{1,i} \left( \frac{W_r}{x_{1,i}} - 1 \right) + \sum_{i \in M_2}^{n_2} y_{2,i} W_r + y_n \sum_{i \in M}^n B_i \left( \frac{W_r}{x_i} - 1 \right). \quad (4)$$

Завдання полягає у виборі набору таких значень  $X_i^*$  ( $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), за якими мінімізується функціонал (4).

Область можливих значень для величин  $X_i^*$ , коли рекомендується періодичність регламентних робіт, має лежати в просторі одновимірних правильних ґраток вигляду:

$$x_i^* = w x_{\min}, \quad w = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Якщо в кожній точці ґратки виявиться не менш однієї роботи  $x_i$ , то ґратку можна назвати щільною.

Зазвичай з метою скорочення збитків від простоїв НО максимально можливу кількість робіт намагаються поєднувати в часі. У таких умовах термін виконання кожної  $i$ -ї роботи повинний бути кратним терміну виконання  $(i-1)$ -ї роботи:

$$x_1^{**} = \frac{1}{q_1} x_2^{**} = \frac{1}{q_2} x_3^{**} = \dots = \frac{1}{q_{n-1}} x_n^{**}, \quad (6)$$

де  $q_1 < q_2 < \dots < q_{n-1}$  – числа натурального ряду.

Сукупність чисел  $X_i^{**}$ , що задовольняють умову (6), можна назвати неправильною ґраткою тому, що вона має пропуски в просторі вигляду (5).

Значення  $X_n^{**}$  і  $X_1^{**}$  зазвичай відомі заздалегідь. Вони вибираються по тактичних розуміннях.

Кількість же проміжних форм профілактики і їх періодичність можна визначити в результаті канонічного розкладання частинки:

$$\frac{x_n^{**}}{x_1^{**}} = v_1^{\alpha_1} v_2^{\alpha_2} \dots v_k^{\alpha_k}.$$

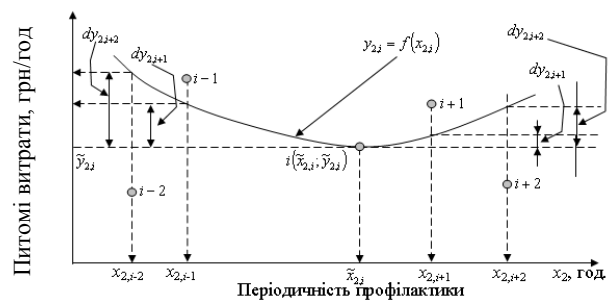


Рис. 8. Сукупність робіт підмножини  $M_2$

Маючи канонічне розкладання цієї частинки, у просторі можна розмістити стільки неправильних ґраток, скільки можна зробити перестановок з показників канонічного розкладання:

$$N = \frac{\left(\sum_{i=1}^k \alpha_i\right)!}{\alpha_1! \times \alpha_2! \times \dots \times \alpha_k!}.$$

Сума показників канонічного розкладання  $\sum_{i=1}^k \alpha_i$

означає максимальну можливу кількість форм профілактики в одному циклі, не враховуючи першої  $X_1^{**}$ .

Значення  $q_1, q_2, \dots, q_{n-1}$  для кожної з неправильних ґраток визначають послідовним перемноженням основ канонічного розкладання.

Після виконання операцій зведення всіх робіт до відповідних форм профілактики природно шукати глобальний мінімум функціонала у на безлічі всіх можливих ґратчастих просторів вигляду (5), (6).

Якщо будь-яку  $i$ -ту точку, змінюючи її оптимальну періодичність, сполучити з однією з  $(n_2 - 1)$ , що залишилися, то обидві сумісні роботи можна виконувати паралельно, зменшуючи загальні збитки від простою НО на цих роботах.

З  $(n_2 - 1)$  варіантів сполучення робіт підмножини  $M_2$  треба вибрати ті, що задовольняють умову:

$$S'(h) = \min_{1 \leq i \leq n_2} \left\{ \begin{array}{l} W_r [f(x_{2,i-1}) - f(x_{2,i})] \\ W_r [f(x_{2,i+1}) - f(x_{2,i})] \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Оскільки роботи підмножини  $M_1$  можна сполучати тільки з попередніми, для них оптимальна стратегія повинна виражатися умовою:

$$S''(h) = \min_{1 \leq i \leq n_1} \left\{ y_{1,i} \left[ \left( \frac{W_r}{x_{1,i-1}} - 1 \right) - \left( \frac{W_r}{x_{1,i}} - 1 \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Стратегії умов (7) і (8) дозволяють провести послідовне скорочення кількості робіт так, що при будь-якій фіксованій кількості точок  $X_i^*$  будуть виходити мінімально можливі витрати на ТО і ремонт.

### Висновки

Оптимальним вирішенням сучасних завдань ТО НО та оптимізації профілактичних заходів є пошук оператора, при якому досягається оптимальні критерії процесів при дотриманні умов процесу експлуатації, що дає можливість підвищити рівень ремонту НО.

### Література

1. *Донець О.Д., Боровков О.Н.* Моделювання експлуатаційних процесів в аеропорту// Матеріали конф. "Авіа-2004". – К.: НАУ, 2004. – С. 97–99.
2. *Техническая эксплуатация автомобилей:* Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. /Под ред. Г.В. Крамаренко. – М.: Транспорт, 1993. – 178 с.
3. *Малишев Г.А.* Теория авторемонтного производства. – М.: Транспорт, 1990. – 24 с.
4. *Положение* об отделении технической диагностики и регулировочно-настроечных работ и отделении регламентных работ и технической диагностики. – М.: Воениздат, 1981. – 32 с.

Стаття надійшла до редакції 14.11.06.