

УДК 621.396

**Є.С. Ленков,**

к.т.н. (Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації),

**І.В. Толок,**

к.пед.н. (Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ПЛАНОВИХ РЕМОНТІВ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ ТЕХНІКИ ВИСОКОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

*Технічний ресурс є однією з найважливіших характеристик складних об'єктів техніки, тому процес технічного обслуговування і ремонту повинен включати в себе складову, яка забезпечуватиме оптимальне періодичне та своєчасне поповнення ресурсу. Оптимізація зазвичай стосується двох основних параметрів: параметру потоку відмов та питомої вартості витрат як функції часу, параметрів ремонт-придатності та узагальнених параметрів процесів планових ремонтів. Зазначена проблема аналітичними методами не розв'язується, тому що для функції потоку відмов майже неможливо визначити аналітичний вираз та через складність визначення структури оптимізуючого параметра. У статті пропонується зазначену проблему розв'язувати протягом двох емпіричних етапів.*

*На першому етапі формується безліч умовно оптимальних рішень, що одержані при фіксованих значеннях відсотка заміни елементів.*

*На другому етапі серед множини отриманих умовно оптимальних рішень вибирається єдине оптимальне рішення, при цьому складність полягає в тому, що функція питомої вартості витрат є не гладкою по параметру заміни елементів та може мати не яскраво виражені локальні мінімуми, що не дозволяє повністю автоматизувати другий етап розв'язання задачі. Тому на другому етапі залучається людина-експерт.*

**Ключові слова:** *технічний ресурс, складні об'єкти техніки, оптимізація, потік відмов, вартість витрат.*

*Технический ресурс является одной из важнейших характеристик сложных объектов техники, поэтому процесс технического обслуживания и ремонта должен включать в себя составляющую, которая обеспечит оптимальное периодическое и своевременное пополнение ресурса. Оптимизация обычно касается двух основных параметров: параметра потока отказов и удельной стоимости расходов как функции времени, параметров ремонтпригодности и обобщенных параметров процессов плановых ремонтов. Указанная проблема аналитическими методами не решается, потому что для функции потока отказов почти невозможно определить аналитическое выражение и из-за сложности определения структуры оптимизирующего параметра. В статье предлагается указанную проблему решать в два эмпирических этапа.*

*На первом этапе формируется множество условно оптимальных решений, полученных при фиксированных значениях процента замены элементов. На втором этапе среди множества полученных условно оптимальных решений выбирается единственное оптимальное решение, при этом сложность заключается в том,*

что функция удельной стоимости расходов является не гладкой по параметру замены элементов и может иметь ярко выраженные локальные минимумы, что не позволяет полностью автоматизировать второй этап решения задачи. Поэтому на втором этапе привлекается человек-эксперт.

**Ключевые слова:** технический ресурс, сложные объекты техники, оптимизация, поток отказов, стоимость затрат.

*Technical resource is one of the most important characteristics of complex engineering objects, therefore the process of maintenance and repair should include a component that will ensure the optimal periodic and timely replenishment of the resource. Optimization usually involves two main parameters: the failure flow parameter and the unit cost of costs as a function of time, maintainability parameters, and generalized parameters of scheduled maintenance processes. This problem is solved by analytical methods, because it is almost impossible for the fail-flow function to define an analytic expression and, because of the complexity of determining the structure of the optimizing parameter. Paper proposes to solve this problem in two empirical stages.*

*At the first stage, a lot of conditionally optimal solutions are formed, obtained for fixed values of percent replacement of elements. At the second stage, among the set of obtained conditionally optimal solutions, the only optimal solution is chosen, and the difficulty lies in the fact that the function of unit cost of expenses is not smooth in terms of the element replacement parameter and can have pronounced local minima, which does not fully automate the second stage of the solution tasks. Therefore, at the second stage, an expert is involved.*

**Keywords:** technical resource, complex engineering objects, optimization, failure flow, cost of costs.

**Вступ та постановка задачі.** Ресурс є однією з найважливіших характеристик складних об'єктів техніки (СОТ), тому процес технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) повинен включати в себе складову, яка забезпечуватиме періодичне та своєчасне поповнення ресурсу [1]. Відповідно до [2] ресурс будь-якого СОТ – це “сумарний наробіток з початку експлуатації чи відновлення після ремонту до переходу у граничний стан”. Граничний стан (ГС) це “стан СОТ, при якому подальша експлуатація його неприпустима або недоцільна, або відновлення його працездатності неможливе чи недоцільне”. Ці визначення однаково належать як до відновлювальних, так і до не відновлювальних об'єктів.

На сьогодні достатньо повною мірою розкриті питання розробки моделей та методик оптимізації системи планових ремонтів СОТ, у тому числі за нашою участю [3–8].

#### **Основна частина.**

Стаття присвячена продовженню розв'язання поставленої задачі для СОТ перш за все високої відповідальності.

Для СОТ високої відповідальності, зазвичай, застосовується аперіодична або змішана стратегія планових ремонтів (ПР) [1]. З огляду на це, постановка задачі оптимізації системи ПР визначається виразами:

$$\Omega(t/\mathbf{B}, \mathbf{P}^{\text{opt}}) \leq \Omega^{\text{TP}} ; t \in [0, T_3]; \quad (1)$$

$$c_{\text{уд}}(T_e, \mathbf{B}, \mathbf{P}^{\text{opt}}) = \min_{\{\mathbf{P}\}} c_{\text{уд}}(T_e, \mathbf{B}, \mathbf{P}), \quad (2)$$

де  $\Omega$  – параметр потоку відмов;

$B$  – параметр ремонтпридатності;

$\mathbf{P}^{\text{opt}}$  – оптимальне значення узагальненого параметра процесу ПР  $\mathbf{P}$ ;

$C$  – питома вартість витрат;

$T_e$  – час експлуатації.

Параметр  $\mathbf{P}$  визначається множиною:

$$\mathbf{P} = \{t_{pk}, \mathbf{p}_k; k = \overline{0, N_p}\}, \quad (3)$$

За рахунок того, що  $t_{pk} = t_{pk-1} + R_{pk}$ , замість (3) можна використати більш компактний вираз:

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_k; k = \overline{1, N_p}\} = \{\langle P_{pk}, R_{pk} \rangle; k = \overline{1, N_p}\}, \quad (4)$$

де  $P_{pk}$  – відсоток заміни елементів при виконанні  $k$ -го ПР;

$R_{pk}$  – міжремонтний ресурс між  $(k-1)$ -м та  $k$ -м ремонтами.

Відповідно до цієї постановки вимога до рівня безвідмовності СОР задається обмеженням на так зване миттєве значення показника безвідмовності в довільний момент часу  $t$  на заданому інтервалі експлуатації  $[0, T_s]$ . Саме це визначає завдання (1, 2) як завдання, що належать до об'єктів СОР перш за все високої відповідальності.

На наш погляд, така задача не може бути вирішена аналітичними методами. По-перше, тому що для функції  $\Omega(t/\dots)$  майже неможливо визначити аналітичний вираз, тобто функцію можна отримати тільки в результаті моделювання. По-друге, через складність визначення структури оптимізуючого параметра  $\mathbf{P}$ . Тобто процеси виконання ПР в загальному випадку можуть мати особисті значення параметрів. Тому рішення  $\mathbf{P}^{\text{opt}}$  становить велику кількість (послідовність) взаємопов'язаних елементарних рішень  $\{\mathbf{p}_k^{\text{opt}} = \langle P_{pk}^{\text{opt}}, R_{pk}^{\text{opt}} \rangle\}$ . Всі ці складності унеможливають точне аналітичне розв'язання задач (1 та 2) і змушують шукати шляхи отримання наближеного рішення, по можливості, близького до оптимального.

Пропонуємо зазначені завдання розв'язувати у два етапи.

**Етап 1.** Формується безліч умовно оптимальних рішень  $\{\mathbf{p}^*\}$ , одержуваних при фіксованих значеннях відсотка заміни елементів  $P_p$ . Умовно оптимальне рішення це множина

$$\mathbf{P}^* = \{\mathbf{p}_k^*, k = \overline{1, N_p^*}\}, \quad (5)$$

в якому  $\mathbf{p}_k^* = \langle P_p^*, R_{pk}^* \rangle$ , где  $P_p^* = \text{const}$ .

Умовно оптимальне рішення  $\mathbf{P}^*$  формується на основі критерію забезпечення необхідного значення параметра потоку відмов  $\Omega^{\text{TP}}$  та формально не зв'язується з вимогою мінімізації питомої вартості експлуатації  $c_{\text{уд}}$ . Ця процедура формування умовно оптимального рішення  $\mathbf{P}^*$  заснована на припущенні про те, що функція  $\Omega(t/\dots)$  є монотонною і не убуває по  $t$ . Процедура на кожному  $k$ -м кроці формує елементарне рішення  $\mathbf{p}_k^*$  з урахуванням рішень, що прийняті в попередніх кроках.

На першому кроці визначається ресурс до першого ПР з умови:

$$R_{p1}^* = \max t : \Omega(t / \mathbf{B}, \emptyset) \leq \Omega^{\text{TP}}; \quad t \in [0, T_3],$$

де  $\Omega(t / \mathbf{B}, \emptyset)$  – функція параметра потоку відмов за умови, що ніякі ПР на інтервалі  $[0, t]$  не проводяться.

Після першого кроку формується елементарне рішення  $\mathbf{p}_1^* = \langle P_p', R_{p1}^* \rangle$ .

На другому кроці визначається міжремонтний ресурс до 2-го ПР за умови, що перший ПР вже виконано. Його величина  $R_{p2}^*$  визначається із умови:

$$R_{p2}^* = \max t : \Omega(t / \mathbf{B}, \{\mathbf{p}_1^*\}) \leq \Omega^{\text{TP}}; \quad t \in (t_{p1}, T_3], \quad (6)$$

де  $\Omega(t / \mathbf{B}, \{\mathbf{p}_1^*\})$  – функція параметра потоку відмов, яка отримана за умови, що виконано перший ПР з параметрами  $\mathbf{p}_1^*$ ;

$t_{p1}$  – час (сумарне напрацювання) проведення першого ПР ( $t_{p1} = R_{p1}^*$ ).

Після другого кроку виходить елементарне рішення  $\mathbf{p}_2^* = \langle P_p', R_{p2}^* \rangle$ .

На  $k$ -м кроці визначається міжремонтний ресурс між  $(k-1)$ -м та  $k$ -м ремонтами  $R_{pk}^*$  при умові, що вже виконані всі  $k-1$  ремонтів в моменти часу  $t_{p1}, \dots, t_{pk-1}$ .

Нехтуючи тривалістю ПР, приймаємо, що  $t_{pk} = \sum_{i=1}^k R_{pi}^*$ .

Величина  $R_{pk}^*$  визначається за умови:

$$R_{pk}^* = \max t : \Omega(t / \mathbf{B}, \{\mathbf{p}_1^*, \mathbf{p}_2^*, \dots, \mathbf{p}_{k-1}^*\}) \leq \Omega^{\text{TP}}; \quad t \in (t_{pk-1}, T_3],$$

де  $\Omega(t / \mathbf{B}, \{\mathbf{p}_1^*, \mathbf{p}_2^*, \dots, \mathbf{p}_{k-1}^*\})$  – функція параметра потоку відмов, отримана за умови, що виконані всі  $k-1$  ПР з параметрами  $\mathbf{p}_1^*, \dots, \mathbf{p}_{k-1}^*$ ;

$t_{pk-1}$  – час проведення  $(k-1)$ -го ПР.

Після виконання  $k$ -го кроку виходить рішення  $\mathbf{p}_k^* = \langle P_p', R_{pk}^* \rangle$ .

Умовне оптимальне рішення  $\mathbf{P}^*$  формується шляхом додавання в нього на кожному кроці чергового отриманого елементарного рішення  $\mathbf{p}_k^*$ :

$$\mathbf{P}^* := \mathbf{P} \cup \{\mathbf{p}_k^*\}.$$

Розглянутий процес покрокового формування умовно оптимального рішення проілюстровано на рис. 1.

Процес формування рішення  $\mathbf{P}^*$  триває до тих пір, поки не виявиться, що на певному етапі час проведення чергового ремонту  $t_{pk}$  виходить за межі заданого інтервалу експлуатації  $[0, T_3]$ . Як умовно оптимальної кількості ПР  $N_p^*$  приймається число виконаних кроків  $k$ .

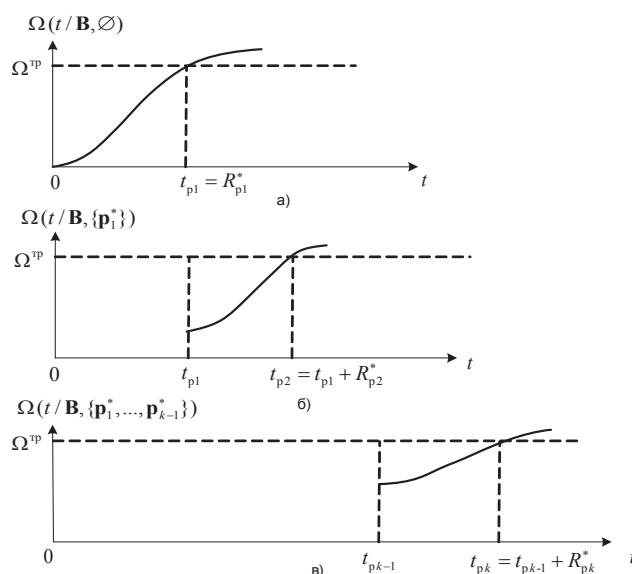


Рис. 1. Опис процедури формування умовно оптимального рішення

Для кожного умовно оптимального рішення  $\mathbf{P}^*$  обчислюється питома вартість експлуатації  $c_{уд}(T_3, \mathbf{B}, \mathbf{P}^*)$ .

Розглянутим способом на першому етапі формується безліч умовно оптимальних рішень  $\{\mathbf{P}^*\}$ , що відповідають заданим значенням відсотка заміни елементів  $P'_p$  з безлічі  $\{P_p\}$ . Тут кожному значенню  $P'_p \in \{P'_p\}$  відповідає єдине умовно оптимальне рішення  $\mathbf{P}^* \in \{\mathbf{P}^*\}$ .

**Етап 2.** Серед множини отриманих умовно оптимальних рішень вибирається єдине рішення  $\mathbf{P}^{opt}$ , що задовольняє умові:

$$c_{уд}(T_3, \mathbf{B}, \mathbf{P}^{opt}) = \min_{\{\mathbf{P}^*\}} c_{уд}(T_3, \mathbf{B}, \mathbf{P}^*) . \quad (7)$$

Складність полягає в тому, що функція  $c_{уд}(T_3, \mathbf{B}, \mathbf{P}^*)$  є не гладкою по параметру  $P'_p$  та може мати не яскраво виражені локальні мінімуми. Саме тому повністю автоматизувати другий етап рішення задачі неможливо. Тому на другому етапі для визначення оптимального значення  $P_p^{opt}$  і відповідного йому оптимального рішення  $\mathbf{P}^{opt}$  залучається людина-експерт. Для цього розроблені алгоритми і програмне забезпечення, які дозволяють візуалізувати залежність  $c_{уд}(T_3, \mathbf{B}, \mathbf{P}^*)$  по параметру  $P'_p$ . Після цього на основі візуального аналізу залежності  $c_{уд}(P'_p)$  експерт зможе прийняти остаточне рішення щодо вибору оптимального значення  $P_p^{opt}$ , відповідного мінімуму функції  $c_{уд}(P'_p)$ :

$$c_{уд}(P_p^{opt}) = \min_{\{P'_p\}} c_{уд}(P'_p) .$$

Після цього як рішення поставленої задачі  $\mathbf{P}^{opt}$  приймається умовно оптимальне рішення  $\mathbf{P}^*$ , що отримується при  $P'_p = P_p^{opt}$ .

Розглянуті два етапи – це своєрідне теоретичне обґрунтування запропонованої методики рішення поставленої задачі. Усі необхідні при цьому розрахунки програмно реалізовані.

Для практичного рішення цих задач необхідно:

1. Створити бази даних для конкретних СОТ та ввести до них всю необхідну інформацію.

2. Задати діапазон варіювання відсотка заміни елементів  $[P'_{p \min}, P'_{p \max}]$  та провести розрахунки в режимі Пошук оптимальної системи ПР (СОТ високої відповідальності). У результаті буде виконано один сеанс моделювання і на екран монітора ПК буде виведений графік однієї реалізації залежно  $c_{уд}^*(P'_p)$  для  $P'_p \in [P'_{p \min}, P'_{p \max}]$ .

Рекомендується виконати кілька сеансів моделювання для отримання стійкого рішення задачі. Необхідна кількість сеансів визначається експертом після досягнення стійкого положення мінімуму функції  $c_{уд}^*(P'_p)$ .

3. На основі візуального аналізу функції  $\bar{c}_{уд}^*(P'_p)$  визначити оптимальне значення  $P_p^{opt}$ , при якому досягається мінімум функції  $\bar{c}_{уд}^*(P'_p)$ :

$$P_p^{opt} : \bar{c}_{уд}^*(P_p^{opt}) = \min_{\forall P'_p} \bar{c}_{уд}^*(P'_p).$$

4. Визначити відповідне до оптимального значення  $P_p^{opt}$  умовно оптимальне рішення  $\mathbf{P}^*$  та прийняти його як оптимальне рішення  $\mathbf{P}^{opt}$ , що є вирішенням завдання.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прогнозування надійності складних об'єктів радіоелектронної техніки та оптимізація параметрів їх експлуатації імітаційних статистичних моделей: монографія. / [С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В. Банзак, В.О. Браун]: під ред. С.В. Ленкова. – Одеса: Вид-во “ВМВ”, 2014. 248 с.

2. Банзак Г.В., Боряк К.Ф., Ленков Є.С. и др. Моделирование процесса технического обслуживания “по состоянию” сложного восстанавливаемого объекта РЭТ. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2010. № 29. С. 4–9.

3. Ленков Є.С., Жиров Г.Б., Бондаренко Т.В. Формализованная математическая модель процесса адаптивного технического обслуживания по состоянию сложной радиоэлектронной техники. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2016. Т. 6. № 4. С. 365–371.

4. Ленков С.В., Ленков Є.С. Формалізована методика оптимізації параметрів стратегії технічного обслуговування за ресурсом складних виробів тривалої експлуатації. Сучасна спеціальна техніка. 2016. № 4(47). С. 3–8.

5. Lenkov S., Zhyrov G., Zaytsev D. and others, 2017. Features of Modelling Failures of Recoverable Complex Technical Objects with a Hierarchical Constructive Structure. Eastern-European Magazine of Advanced Technologies. № 4/4(88). 34–42.

6. Ленков Є.С. Узагальнена математична модель процесу технічного обслуговування і ремонту складної техніки. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2017. № 2. С. 186–191.

7. Жиров Г.Б., Ленков Є.С., Толок І.В. Алгоритмічна модель адаптивного технічного обслуговування за станом озброєння і військової техніки. Збірник праць Національної академії Державної прикордонної служби України імені Б. Хмельницького. Серія: військові та технічні науки. 2017. № 1(71). С. 368–378.

8. Ленков Є.С. Загальна математична модель процесу технічного обслуговування складного технічного об'єкту. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2017. № 4. С. 120–123.

Отримано 26.10.2017

Рецензент Рибальський О.В., д.т.н., проф.