

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТА РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

У статті розглядаються питання визначення оптимальних параметрів автоматизованої системи технічного обслуговування (АСТО) складного об'єкта радіоелектронної техніки (РЕТ) на етапі його розробки. В якості параметрів АСТО використовуються параметри можливих стратегій технічного обслуговування (ТО). Оптимальні параметри АСТО визначаються на основі застосування спеціального програмного забезпечення, в якому реалізовані моделі оптимізації параметрів різних стратегій ТО об'єкта РЕТ.

Розроблена методика визначення оптимальних параметрів АСТО, що дозволяє вибрати відповідні стратегії ТО і визначити їх оптимальні параметри. Оптимізація проводиться за критерієм мінімуму питомої вартості експлуатації об'єкта за умови забезпечення необхідного рівня його безвідмовності.

Розглянуто питання можливої апаратно-програмної реалізації АСТО. Наведено приклад, що ілюструє застосування методики для простого тестового об'єкта РЕТ.

Ключові слова: технічне обслуговування і ремонт, стратегія технічного обслуговування, оптимізація параметрів стратегії технічного обслуговування, показники надійності та вартості експлуатації.

Постановка задачі. *Призначення і функції АСТО.* Розглядаються складні об'єкти радіоелектронної техніки (РЕТ), призначені для тривалого багаторазового їх застосування. Прикладами таких об'єктів є радіолокаційні станції (комплекси), станції радіоелектронної боротьби, елементи зенітно-ракетних комплексів і т. п. Характерною особливістю об'єктів РЕТ є наявність в їх складі великої кількості різнотипних радіоелектронних елементів (електронні прилади, мікросхеми, друковані плати, електричні та оптоелектронні кабелі тощо), механічних, електромеханічних, гідравлічних елементів (електро-двигуни, гідроприводи, електричні роз'єми). Для підтримки необхідного рівня їх надійності протягом усього строку експлуатації проводиться технічне обслуговування (ТО) [1]. Суть ТО полягає в періодичній перевірці технічного стану (ТС) об'єкта і превентивної заміну окремих елементів, що перебувають у передбаченому стані.

Автоматизована система технічного обслуговування (АСТО) призначена для автоматичного вимірювання параметрів, що визначають ТС об'єкта, прогнозування їх значень та розрахунку оптимальних термінів проведення робіт ТО. Для сучасних типів об'єктів РЕТ характерна наявність вбудованої автоматизованої системи технічного діагностування (АСТД), яка призначена для оперативного діагностування ТС об'єкта в процесі його застосування за призначенням та при проведенні поточного ремонту. У зв'язку з цим АСТО можна розглядати як розширення АСТД за рахунок включення в неї засобів вимірювання параметрів, що визначають ТС об'єкта, введення функцій прогнозування ТС і розрахунків оптимальних термінів проведення необхідних операцій ТО.

Під стратегією ТО умовимося розуміти спосіб організації робіт з планування і виконання операцій ТО. Визначення (вибір) стратегії ТО для того або іншого конкретного типу об'єкта РЕТ повинен здійснюватися на етапі його розробки, коли визначаються його склад і конструкція, коли «закладаються» його надійнісні властивості, в тому числі і властивості ремонтпридатності. В якості основної стратегії ТО, яку передбачається реалізувати в АСТО, приймається стратегія ТО за станом з адаптивною зміною періодичності контролю (ТОС-А) [2]. У тих випадках, коли для частини елементів ТОС-А виявляється недоцільним з економічних причин (або неможливим з інших причин) в якості додаткової стратегії можна використовувати стратегію по ресурсу (ТОР).

У даній статті пропонується методика параметричного синтезу АСТО (методика визначення оптимальних параметрів АСТО), яка заснована на застосуванні програмного

забезпечення (програма ISMPN), відомості про яке наведено в [3]. Розглянуто можливий варіант апаратно-програмної реалізації АСТО. Наведено приклад застосування методики.

Методика визначення оптимальних параметрів АСТО. Параметри АСТО позначимо узагальнено $P_{\text{асто}}$. З урахуванням цього завдання визначення оптимальних параметрів АСТО уявімо наступними умовами:

$$\begin{aligned} T_0(P_{\text{асто}}^*) &\geq T_0^{\text{тп}}; \\ c_e(P_{\text{асто}}^*) &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (1)$$

де T_0 - середнє напрацювання на відмову; c_e - середня питома вартість витрат на експлуатацію об'єкта РЕТ¹; $T_0^{\text{тп}}$ - необхідне значення показника T_0 ; $P_{\text{асто}}^*$ - шукані оптимальні параметри АСТО.

Потенційно параметри $P_{\text{асто}}$ включають в себе параметри стратегій ТОС-А $P_{\text{тос-а}}$ і ТОР $P_{\text{тор}}$, які у відповідності з розробленими в [3] моделями визначені наступним чином²:

$$\begin{aligned} P_{\text{тос-а}} &= \langle E_{\text{тос}}, U_{\text{тос}}, \gamma \rangle; \\ P_{\text{тор}} &= \langle E_{\text{тор}}, T_{\text{тор}} \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

де $E_{\text{тос}}$ і $E_{\text{тор}}$ - підмножини елементів об'єкта, обслуговування яких здійснюється у відповідності зі стратегіями ТОС-А і ТОР; $U_{\text{тос}} = \{u_{\text{то}i}; i = \overline{1, |E_{\text{тос}}|}\}$ - вектор нормованих рівнів ТО для елементів, що обслуговуються за станом; $T_{\text{тор}}$ - періодичність ТО елементів, що обслуговуються за ресурсом; γ - коефіцієнт, що регулює адаптацію періодичності ТО за критерієм мінімуму вартісних витрат [2].

У моделі ТОС-А [2] прийнято, що ТС елемента характеризується деяким фізичним параметром, що визначає ступінь його працездатності (визначальним параметром). Нормоване значення визначального параметра (ВП) i -го елемента позначається $u_i(t)$, нормування зроблено таким чином, що $u_i(t) \in [0, 1]$, причому значення $u_i(t) = 0$ відповідає його номінальним (розрахунковим) значенням, значення $u_i(t) = 1$ відповідає не працездатному стану. В процесі експлуатації значення $u_i(t)$ випадковим чином змінюється (деградує), поступово наближаючись до значення 1.

Під *рівнем ТО* $u_{\text{то}i}$ розуміється таке значення ВП, при досягненні якого повинно проводитися ТО (заміна) елемента.

З урахуванням (2) постановку задачі (1) у розгорнутому вигляді можна представити наступним чином:

$$\begin{aligned} T_0(\langle E_{\text{тос}}^*, U_{\text{тос}}^*, \gamma^* \rangle \cup \langle E_{\text{тор}}^*, T_{\text{тор}}^* \rangle) &\leq T_0^{\text{тп}}, \\ c_e(\langle E_{\text{тос}}^*, U_{\text{тос}}^*, \gamma^* \rangle \cup \langle E_{\text{тор}}^*, T_{\text{тор}}^* \rangle) &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\langle E_{\text{тос}}^*, U_{\text{тос}}^*, \gamma^* \rangle$ і $\langle E_{\text{тор}}^*, T_{\text{тор}}^* \rangle$ - шукані оптимальні значення параметрів стратегій ТОС-А і ТОР, які потрібно визначити і реалізувати в розроблюваній АСТО.

Пропонована методика розв'язання задачі (3) включає наступні етапи:

1 етап. Надійнісний аналіз об'єкта. На цьому етапі потрібно виконати наступне:

- створити БД (за допомогою програми ISMPN у режимі **База даних**), в яку ввести всю необхідну інформацію про об'єкт: склад, параметри конструктивної і надійнісної структури, показники надійності і вартості елементів, і т. д. (питання підготовки вихідних даних для програми ISMPN розглянуті в [4]);

¹ Враховується вартість замінюваних елементів, вартість робіт ТО і вартість втрат при простоях об'єкта в непрацездатному стані.

² У позначеннях параметрів для стислості замість ТОС-А будемо використовувати скорочення ТОС.

- визначити множину елементів E_o , відмови яких повинні моделюватися при визначенні прогнозних оцінок показників T_0 і c_e (методика розглянута в [5]);

- за допомогою програми ISMPN у режимі **Моделювання** провести розрахунки прогнозних оцінок показників T_0 і c_e за умови, що ТО не проводиться (методика і приклади розглянуті в [6]);

- оцінити відповідність (або невідповідність) розрахункового значення показника безвідмовності T_0 заданому необхідному значенню T_0^{TP} . Обґрунтувати рішення про необхідність проведення ТО для даного типу об'єкта РЕТ;

- визначити вихідні множини потенційно обслуговуваних елементів $E_{\text{тоc}}^0$ і $E_{\text{тоp}}^0$, для яких може застосовуватися стратегія ТОС-А і ТОР відповідно. У множину $E_{\text{тоc}}^0$ включити елементи, для яких відомі вимірювані ВП і є можливість їх вимірювання. У множину $E_{\text{тоp}}^0$ включити елементи, для яких ВП відсутні, однак через передбачувану недостатню їх надійність для цих елементів можливо буде потрібно ТО. Для множин $E_{\text{тоc}}^0$ і $E_{\text{тоp}}^0$ повинні задовольнятися наступні співвідношення: $E_{\text{тоc}}^0 \subset E_o$; $E_{\text{тоp}}^0 \subset E_o$; $E_{\text{тоc}}^0 \cap E_{\text{тоp}}^0 = \emptyset$.

2 етап. Визначення оптимальних параметрів ТО. На цьому етапі проводяться розрахунки оптимальних параметрів ТО $P_{\text{асто}}^*$, які повинні бути реалізовані технічними і програмними засобами у розроблювальній АСТО. Розрахунки проводяться за допомогою програми ISMPN в режимах **Оптимізація ТО**. Рекомендується наступна послідовність розрахунків:

- знайти умовно оптимальні параметри $P_{\text{тоc}}^+$ (оптимальні за умови заданої множини обслуговуваних елементів $E_{\text{тоc}} = E_{\text{тоc}}^0$):

$$P_{\text{тоc}}^+ = \langle E_{\text{тоc}}^0, U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+ \rangle, \quad (4)$$

де параметри $U_{\text{тоc-a}}^+$ і γ^+ визначаються з умови:

$$c_e \left(\langle E_{\text{тоc}}^0, U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+ \rangle \right) \rightarrow \min_{U_{\text{тоc}}, \gamma}$$

Методика визначення $P_{\text{тоc}}^+$ викладена в [2].

Якщо задана також множина $E_{\text{тоp}}^0$, тоді з використанням програми ISMPN знайдемо також спільні умовно оптимальні параметри $P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+$:

$$P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+ = \langle E_{\text{тоc}}^0, U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+ \rangle \cup \langle E_{\text{тоp}}^0, T_{\text{тоp}}^+ \rangle, \quad (5)$$

де параметри $U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+$ були знайдені раніше, а параметр $T_{\text{тоp}}^+$ знаходиться з умови:

$$c_e \left(\langle E_{\text{тоc}}^0, U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+ \rangle \cup \langle E_{\text{тоp}}^0, T_{\text{тоp}}^+ \rangle \right) \rightarrow \min_{U_{\text{тоc}}, \gamma, T_{\text{тоp}}}$$

- при розрахунках параметрів $P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+$ одночасно визначаються також одержувані при цих значеннях параметрів оцінки показників T_0^+ і c_e^+ :

$$T_0^+ = T_0(P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+) \quad \text{і} \quad c_e^+ = c_e(P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+).$$

- якщо задовольняється вимога $T_0^+ \geq T_0^{TP}$, тоді отримане вище умовно оптимальне рішення (5) прийняти в якості оптимального рішення $P_{\text{асто}}^*$:

$$P_{\text{асто}}^* = P_{\text{тоc}}^+ \cup P_{\text{тоp}}^+ = \langle E_{\text{тоc}}^0, U_{\text{тоc}}^+, \gamma^+ \rangle \cup \langle E_{\text{тоp}}^0, T_{\text{тоp}}^+ \rangle. \quad (6)$$

У відповідності з отриманим рішенням (6) знайдені оптимальні параметри ϵ : $E_{\text{тоc}}^* = E_{\text{тоc}}^0$, $U_{\text{тоc}}^* = U_{\text{тоc}}^+$, $\gamma^* = \gamma^+$; $E_{\text{тоp}}^* = E_{\text{тоp}}^0$, $T_{\text{тоp}}^* = T_{\text{тоp}}^+$. Ці значення параметрів підлягають реалізації в АСТО.

Якщо вимога $T_0^+ \geq T_0^{\text{TP}}$ не виконується, необхідно продовжити пошук шуканого рішення шляхом додавання в множину $E_{\text{тор}}^0$ додаткових елементів, вибраних з множини $E_{\text{обсл}} = E_0 \setminus (E_{\text{тос-а}}^0 \cup E_{\text{тор}}^0)$. Пошук проводити шляхом наступної покрокової процедури, виконуючи на кожному кроці такі дії:

(1) вибрати з множини $E_{\text{обсл}}$ найменш надійний елемент e_i і додати його у $E_{\text{тор}}^0$: $E_{\text{тор}}^+ = E_{\text{тор}}^0 \cup \{e_i\}$, де $E_{\text{тор}}^+$ - новий склад елементів, що обслуговуються у відповідності зі стратегією ТОР;

(2) знайти при новому складі $E_{\text{тор}}^+$ спільне умовно оптимальне рішення $P_{\text{тос-а}}^+ \cup P_{\text{тор}}^+$ та оцінки показників T_0^+ і c_e^+ , що досягаються при його застосуванні;

(3) перевірити виконання вимоги $T_0^+ \geq T_0^{\text{TP}}$. Якщо вимога як і раніше не виконується і ще не всі елементи $E_{\text{обсл}}$ були вичерпані, перейти до п. (1) і продовжити пошук. Якщо на деякому кроці вимога $T_0^+ \geq T_0^{\text{TP}}$ буде виконана, подальші розрахунки припиняються, отримане умовно оптимальне рішення приймається в якості вирішення задачі $P_{\text{асто}}^*$. Відмінність від рішення (6) в даному випадку полягає тільки в тому, що в ньому замість множини $E_{\text{тор}}^0$ приймається нова множина $E_{\text{тор}}^+$.

В іншому випадку, якщо вичерпана множина $E_{\text{обсл}}$ і вимога $T_0^+ \geq T_0^{\text{TP}}$ як і раніше не виконується, перейти до 3 етапу розв'язання задачі.

3 етап. Розширення множини елементів, що обслуговуються «за станом». Даний етап виконується в тій ситуації, коли стало ясно, що за рахунок обслуговування тільки елементів $E_{\text{тос}}^0$ (стратегія ТОС-А) і елементів $E_{\text{тор}}^+$ (стратегія ТОР) не вдається забезпечувати задану вимогу $T_0^+ \geq T_0^{\text{TP}}$, і єдиним виходом для вирішення проблеми залишається розширення множини $E_{\text{тос}}^0$ шляхом включення в нього нових елементів. Вирішувати завдання пропонується наступним чином.

Необхідно проаналізувати елементи, що залишилися та не ввійшли у $E_{\text{тос}}^+$ і $E_{\text{тор}}^+$ (множину цих елементів раніше ми позначили $E_{\text{обсл}}$) з точки зору вибору додаткових елементів, для яких можна було б знайти ВП і реалізувати технічні засоби для їх вимірювання. При цьому можливо можуть знадобитися додаткові дослідження (і час) для виявлення цих елементів відповідних ВП. Очевидно, що такий аналіз може здійснюватися тільки експертами-розробниками (головним конструктором). При виборі додаткових елементів для включення їх у множину $E_{\text{тос-а}}^0$ природними обмеженнями для розробника можуть бути два: (а) відсутність для цього елемента якого-небудь фізичного параметра, що характеризує його ТС, який можна було б виміряти відносно нескладними технічними засобами, і (б) – занадто великі економічні витрати, які можуть знадобитися для реалізації технічних засобів вимірювання ВП.

В допомогу експерту в якості комп'ютерної підтримки для такого аналізу пропонується наступна методика, що дозволяє оцінити очікуваний вигравш в надійності і вартості експлуатації об'єкта, що отримується в разі, якщо в число обслуговуваних елементів додатково включається ще один елемент. Величини очікуваних вигравшу в надійності ΔT_{0i}^+ і сумарного вигравшу у вартості експлуатації ΔC_{ei}^+ , які можна було б отримати за рахунок включення елемента e_i у множину $E_{\text{тос}}^0$, можна визначити наступним чином:

- провести розрахунки оптимальних параметрів $P_{\text{тос-а}}^+$ за умови, що елементами, які обслуговуються є елементи вихідної множини $E_{\text{тос}}^0$, і визначити (і запам'ятати) одержувані при цьому оцінки показників T_0^+ і c_e^+ ;

- вибрати у множині $E_{\text{обсл}}$ елемент e_i і додати його у множину $E_{\text{тос}}^0$. Нова множина $E_{\text{тос}i}^0 = E_{\text{тос}}^0 \cup \{e_i\}$ збереже в БД програми ISMPN (методика викладена в [3]);

- знову провести розрахунки параметрів $P_{\text{тос-а}}^+$ за умови, якщо обслуговуваними елементами є тепер елементи нової множини $E_{\text{тос}i}^0$, і, як і раніше, визначити оцінки показників T_{0i}^+ і c_{ei}^+ ;

- за отриманими результатами розрахувати величини ΔT_{0i}^+ і ΔC_{ei}^+ таким чином:

$$\begin{aligned}\Delta T_{0i}^+ &= T_{0i}^+ - T_0^+; \\ \Delta C_{ei}^+ &= (c_{ei}^+ - c_e^+) T_e,\end{aligned}\quad (7)$$

де T_e - розрахунковий (заданий) період експлуатації об'єкта.

Використовуючи отриману інформацію, зіставляючи її з наявними у нього експертними уявленнями, розробник приймає рішення про прийнятність (або неприйнятність) додаткових витрат, необхідних для реалізації технічних засобів вимірювання ВП для елемента, який ми збираємося додати у множину $E_{\text{тос}}^0$.

Отримані нові значення показників T_{0i}^+ і c_{ei}^+ оцінити з точки зору їх відповідності наявним вимогам. Якщо умова $T_{0i}^+ \geq T_0^{\text{тп}}$ знову не виконується, продовжити розширення множини $E_{\text{тос}i}^0$ описаним вище чином до тих пір, поки не буде досягнутий необхідний рівень прогнозованої надійності об'єкта. При цьому на кожному кроці потрібно заново уточнювати умовно оптимальну множину елементів $E_{\text{тор}}^+$ (може виявитися, що на деякому кроці воно буде порожнім).

Отже, у результаті застосування розглянутої методики виходять близькі до оптимального значення параметрів $E_{\text{тос}}^*$, $U_{\text{тос}}^*$, γ^* , $E_{\text{тор}}^*$ і $T_{\text{тор}}^*$, при яких буде задовольнятися умова (3).

Апаратно-програмна реалізація АСТО. Апаратно-програмна реалізація АСТО істотно залежить від прийнятої розробником концепції побудови об'єкта РЕТ, від використовуваної елементної бази, від обраної архітектури програмного забезпечення АСТД та об'єкта в цілому. У будь-якому випадку в складі АСТО повинні бути такі функціональні елементи:

- база даних (БД), призначена для зберігання інформації, необхідної для функціонування АСТО: дані про результати вимірювань ВП і їх прогнозованих оцінках, дані про рівні ТО елементів, журнали документування історії змін ТС об'єкта і т. д.;

- центральний процесор (ЦП), що здійснює обробку інформації та необхідні для функціонування АСТО розрахунки;

- дисплей (Д), призначений для відображення інформації про ТС об'єкта та рекомендацій (вказівок) обслуговуючому персоналу за виконання робіт ТО;

- датчики інформації про ТС елементів, розташовані, як правило, у конструкції самих елементів. Такі датчики можуть бути самими різними в залежності від типу елемента, і включають в себе безпосередньо датчик ВП (ДВП) і алфавітно-цифрового перетворювача (АЦП), що перетворює виміряне значення в цифрову форму;

- генератор тестових впливів (ГТВ), призначений для генерування сигналів, які потрібно подати на вхід елемента для того, щоб можна було виміряти значення ВП даного елемента;

- таймер – не обов'язковий елемент, призначений для визначення часових режимів функціонування АСТО, для синхронізації взаємодії її елементів (функції таймера може виконувати ЦП).

Зв'язок між елементами АСТО може здійснюватися через «загальну шину», наприклад, як це показано на рис. 1, можливий також варіант, коли між частиною елементів обмін даними здійснюється через мережу Wi-Fi.

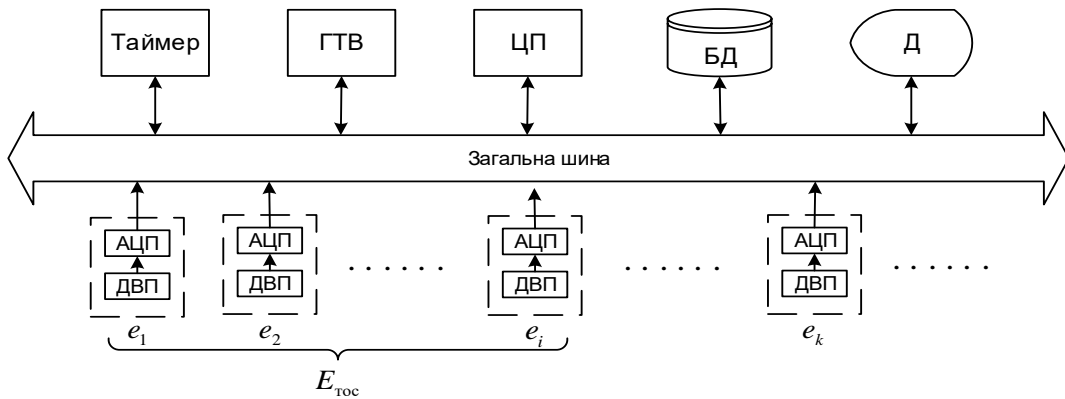


Рис. 1. Базовий варіант складу і структури апаратної частини АСТО

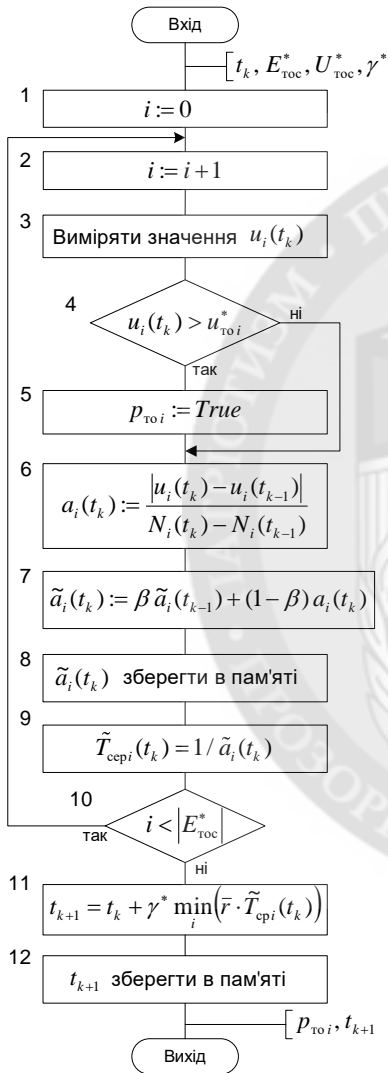


Рис. 2. Структурна схема алгоритму планування.

Багато (або навіть більшість) з елементів, показаних на рис. 1, можуть бути загальними для АСТО і АСТД. Наприклад, частина датчиків ТС елементів може бути загальною, деякі з датчиків можуть бути спеціалізованими і роздільно належати до АСТО або АСТД. Це ж відноситься і до ГТВ, який в деяких випадках (у простих системах) взагалі може бути відсутнім.

Програмне забезпечення АСТО повинно включати в себе програму-монітор, що здійснює управління процесом функціонування системи, а також ряд програмних модулів, що забезпечують необхідні розрахунки і діалог з оператором.

На рис. 2 зображена структурна схема алгоритму, який виконується при кожному включенні апаратури об'єкта. Цим алгоритмом реалізуються розрахунки, необхідні для здійснення стратегії ТОС-А [2]. Пояснимо коротко суть цього алгоритму.

Оператори 1, 2 і 10 утворюють цикл, в якому здійснюється перебір всіх елементів, для яких є ВП і проводиться їх вимірювання. Оператор 3 виробляє вимір ВП та розрахунки за його нормування ($u_i(t_k)$ - нормоване значення ВП i -го елемента, виміряний в момент часу t_k).

Якщо величина $u_i(t_k)$ перевищує задане значення рівня ТО $u_{\text{то}i}^*$, виконується оператор 5, який формує ознаку необхідності заміни i -го елемента $p_{\text{то}i}$. Оператор 6 обчислює вимірне значення швидкості деградації ВП i -го елемента $a_i(t_k)$ ($N_i(t_k)$ - напрацювання i -го елемента в момент часу t_k). Оператор 7 розраховує прогнозоване з урахуванням передісторії середнє значення швидкості деградації ВП $\tilde{a}_i(t_k)$ (вибір постійної згладжування β у даній статті ми не обговорюємо, приймаємо $\beta = 0,5$). Оператор 8 запам'ятовує отримане значення $\tilde{a}_i(t_k)$ в БД. Оператор 9 розраховує прогнозоване значення середнього напрацювання до відмови i -го елемента $\tilde{T}_{\text{ср}i}(t_k)$

Якщо величина $u_i(t_k)$ перевищує задане значення рівня ТО $u_{\text{то}i}^*$, виконується оператор 5, який формує ознаку необхідності заміни i -го елемента $p_{\text{то}i}$. Оператор 6 обчислює вимірне значення швидкості деградації ВП i -го елемента $a_i(t_k)$ ($N_i(t_k)$ - напрацювання i -го елемента в момент часу t_k). Оператор 7 розраховує прогнозоване з урахуванням передісторії середнє значення швидкості деградації ВП $\tilde{a}_i(t_k)$ (вибір постійної згладжування β у даній статті ми не обговорюємо, приймаємо $\beta = 0,5$). Оператор 8 запам'ятовує отримане значення $\tilde{a}_i(t_k)$ в БД. Оператор 9 розраховує прогнозоване значення середнього напрацювання до відмови i -го елемента $\tilde{T}_{\text{ср}i}(t_k)$

Після завершення перебору всіх обслуговуваних елементів виконується 11, який розраховує оптимальне значення часу проведення наступного ТО t_{k+1} (\bar{r} - середня інтенсивність витрачання ресурсу об'єкта). Оператор 12 запам'ятовує отримане значення t_{k+1} в БД.

Результуючою інформацією є сформовані значення ознак p_{toi} (за цими ознаками на дисплеї відображається список елементів, які підлягають (заміні) в поточний момент часу t_k) і запланований час наступного ТО t_{k+1} .

Приклад застосування методики. Для прикладу візьмемо простий (тестовий) об'єкт РЕТ, що складається з 10 однакових елементів, з'єднаних в сенсі надійності послідовно. Напрацювання до відмови елементів підпорядкована DN -розподілу з параметрами $T_{сері} = 10000$ г і $\nu = 1$ ($T_{сері}$ - середнє напрацювання до відмови, ν - коефіцієнт варіації). DN -розподіл вважається найбільш адекватною моделлю відмов елементів радіоелектронної техніки [7]. Вартісні характеристики елементів об'єкта також поставимо однаковими: вартість елементів $C_{oi} = 1$ у.о.; вартість операції заміни елемента $C_{замі} = 1$ у.о.; вартість операції ТО елемента $C_{toi} = 1$ у.о. Період експлуатації об'єкта, на якому будуть оцінюватися показники T_0 і c_e , задамо рівним $T_e = 10$ років.

Очевидно, що такий тестовий об'єкт є досить штучним і не дозволяє повною мірою продемонструвати всі деталі методики, однак на цьому простому прикладі все ж можна продемонструвати основну ідею методики і окремі її технологічні моменти.

У разі, коли жодне ТО не проводиться, прогнозовані оцінки показників T_0 і c_e для заданого тестового об'єкта виходять наступні (1-й етап методики):

$$T_0 = 906,4 \text{ г.}; \quad c_e = 0,01324 \text{ у.о./г.}$$

Нехай задана вимога до рівня безвідмовності об'єкта дорівнює $T_0^{TP} \geq 1200$ г.

Спочатку перевіримо, якою має бути мінімальна множина елементів $E_{тоc}$, які обслуговуються у відповідності зі стратегією ТОС-А, при якому забезпечувалася б задана вимога T_0^{TP} . Для цього будемо поступово збільшувати кількість елементів у множині $E_{тоc}$ і визначати (з допомогою програми ISMPN) умовно оптимальні параметри $P_{тоc-a}^+$ і досягають при цьому значення показників T_0 і c_e . Результати розрахунків для 3 кроків представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків умовно оптимальних параметрів ТОС-А

Номер кроку i	Умовно оптимальні параметри стратегії ТОС $P_{тоc-a}^+$			Досягаємі значення показників	
	$E_{тоci}^+$	$u_{toi}^+{}^3$	γ^+	T_0^+ , ч	c_e^+ , у.о./г
1	{1}	0,49	0,5	998	0,01243
2	{1, 2}	0,46	0,5	1102	0,01151
3	{1, 2, 3}	0,47	0,5	1238	0,01056

З отриманих результатів видно, що необхідне значення T_0^{TP} забезпечується за умови, якщо кількість обслуговуваних елементів в $E_{тоc}$ дорівнює 3. Якщо для всіх елементів множини $E_{тоc}^+ = \{1, 2, 3\}$ є вимірювані ВП, то в якості оптимальних параметрів АСТО можна було б прийняти такі параметри:

³ У стовпчику вказано значення тільки для останнього доданого елемента

$$P_{\text{асто}}^* = P_{\text{тос-а}}^+ = \langle \{1, 2, 3\}, \{0,49; 0,46; 0,47\}, 0,5 \rangle.$$

При цих параметрах будуть забезпечуватися наступні значення показників T_0 і c_e :

$$T_0^* = T_0^+ = 1238 \text{ г.}; \quad c_e^* = c_e^+ = 0,01056 \text{ у.о./г.}$$

Вихідну задачу в цьому випадку можна було б вважати вирішеною.

Але припустимо, що технічна можливість вимірювання ВП є тільки для перших двох елементів, тому як підмножини елементів, які можуть обслуговуватися з застосуванням стратегії ТОС-А, ми змушені прийняти множину $E_{\text{тос}}^0 = \{1, 2\}$. При такій множині $E_{\text{тос}}^0$ забезпечується тільки $T_0 = 1102$ г, що не задовольняє заданої вимоги $T_0^{\text{тп}} = 1200 \text{ г}$. Тому у відповідності з методикою далі будемо шукати можливість забезпечити задану вимогу до рівня надійності об'єкта за рахунок додаткового ТО, виробленого із застосуванням стратегії ТОР.

Множина елементів $E_{\text{тор}}^+$, які обслуговуються за стратегією ТОР, також будемо формувати покроково, додаючи в нього елементи, що відбираються з множини потенційно обслуговуваних елементів $E_{\text{обсл}} = \{3, 4, \dots\}$. Проведемо 3 кроки таких розрахунків. На кожному кроці будемо шукати умовно оптимальне рішення $P_{\text{тос-а}}^+ \cup P_{\text{тор}}^+$, де $P_{\text{тос-а}}^+$ - знайдене раніше умовно оптимальне рішення за умови, якщо $E_{\text{тос}}^0 = \{1, 2\}$. Отримані результати розрахунків представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків умовно оптимальних параметрів ТОР

Номер кроку i	Умовно оптимальні параметри стратегії ТОР $P_{\text{тор}}^+$		Досягаемі значення показників	
	$E_{\text{тор } i}^+$	$T_{\text{то}}^+, \text{ г}$	$T_0^+, \text{ г}$	$c_e^+, \text{ у.о./г}$
1	{3}	4000	1137	0,01164
2	{3, 4}	2000	1284	0,01144
3	{3, 4, 5}	2000	1403	0,01114

За отриманими даними видно, що вимога $T_0^{\text{тп}} = 1200 \text{ г}$ забезпечується при наступних параметрах АСТО:

$$P_{\text{асто}}^* = P_{\text{тос-а}}^+ \cup P_{\text{тор}}^+ = \langle \{1, 2\}, \{0,49; 0,46\}, 0,5 \rangle \cup \langle \{3, 4\}, 2000 \text{ г} \rangle.$$

При цьому забезпечуватимуться такі значення показників T_0 і c_e :

$$T_0^* = T_0^+ = 1284 \text{ г.}; \quad c_e^* = c_e^+ = 0,01144 \text{ у.о./г.}$$

Висновки.

1. У статті запропоновано методику визначення оптимальних параметрів АСТО складного об'єкта РЕТ на етапі його проектування. В якості параметрів АСТО приймаються параметри стратегій проведення ТО, які потенційно можуть застосовуватися для даного типу об'єктів. Запропонована методика заснована на застосуванні розробленого раніше програмного забезпечення [3].

2. Розглянуто можливий варіант апаратно-програмної реалізації АСТО, в рамках якого передбачається використовувати знайдені оптимальні параметри. Визначено склад і функції основних елементів АСТО.

3. Розглянуто приклад застосування методики для простого (тестового) об'єкта РЕТ. Приклад демонструє основні моменти і послідовність дій розробника при пошуку оптимальних параметрів АСТО.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. с 01.01.1980.
2. Procenko Y. Model of adaptive condition based technical maintenance of radioelectronic technology objects // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ, - 2016 - №54. – С.92 – 96.
3. Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей. Монография / С.В. Ленков, К.Ф. Борjak, Г.В.Банзак, В.О. Браун [и др.] : под ред. С.В.Ленкова. – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.
4. Ленков С.В., Пашков С.А., Борjak К.Ф., Цыцарев В.Н. Программное обеспечение для прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации восстанавливаемых объектов РЭТ // Журнал Харківського університету Повітряних Сил ім.І.Кожедуба «Системи обробки інформації». – Харків, - 2015. - №8(133). – С.41 – 46.
5. Жиров Г.Б., Проценко Я.М., Ленков Є.С., Цицарев В.М. Моделювання процесу відмов відновлювальних об'єктів з ієрархічною конструктивною структурою // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ, - 2017 - №55. – С.30 – 39.
6. Ленков С.В., Банзак Г.В., Цицарев В.Н., Проценко Я.Н. Алгоритм прогнозування для показників надійності і вартості експлуатації об'єктів радіоелектронних засобів озброєння // Журнал Харківського університету Повітряних Сил ім.І.Кожедуба «Системи обробки інформації». – Харків, - 2016. - №9(146). – С.28 – 30.
7. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

REFERENCES:

1. GOST 18322-78. *Sistema tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta tehniki. Terminy i opredeleniya*. Vved. 01.01.1980.
2. Procenko Y. Model of adaptive condition based technical maintenance of radioelectronic technology objects (2016). *Zbirnyk naukovykh prats' Vijs'kovoho instytutu Kyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*. Kyiv. №54. 92 – 96 (in English).
3. Lenkov S.V., Borjak K.F., Banzak G.V., Braun V.O. [и др.] : pod red..Lenkova S.V. (2014) *Prognozirovanie nadezhnosti slozhnyh ob#ektov radiojelektronnoj tehniki i optimizacija parametrov ih tehničeskoj jekspluatatsii s ispol'zovaniem imitacionnyh statisticheskikh modelej*. *Monografija*. Odessa : Izd-vo «VMV». 256.
4. Lenkov S.V., Pashkov S.A., Borjak K.F., Cycarev V.N. (2015). *Programmnoe obespechenie dlja prognozirovaniya pokazatelej nadezhnosti i stoimosti jekspluatatsii vosstanavlivaemyh ob#ektov RJeT*. *Zhurnal Harkivs'kogo universitetu Povitrjanykh Sil im..I.Kozheduba «Sistemy obrobki informatsii»*. Harkiv. №8(133). 41-46(In Russian) .
5. Zhyrov H.B., Protsenko Ya.M., Lienkov Ye.S., Tsytsariyev V.M. (2017) *Modeliuvannya protsesu vidmov vidnovliuval'nykh ob'iektiv z iierarkhichnoiu konstruktyvnoiu strukturoiu*. *Zbirnyk naukovykh prats' Vijs'kovoho instytutu Kyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*. Kyiv. №55. 30-39 (In Russian).
6. Lienkov S.V., Banzak H.V., Tsytsariyev V.N., Protsenko Ya.N. (2016). *Alhorytm prohnozuvannya dlia pokaznykiv nadijnosti i vartosti ekspluatatsii ob'iektiv radioelektronnykh zasobiv ozbroiennia*. *Zhurnal Kharkivs'koho universytetu Povitrianykh Syl im. I. Kozheduba «Systemy obrobky informatsii»*. Kharkiv. №9(146). 28 – 30.
7. Strel'nikov V.P., Feduhin A.V. (2002). *Ocenka i prognozirovanie nadezhnosti jelektronnyh jelementov i sistem*. Kyiv, Logos. 486 (In Russian).

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру, Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ

Проценко Я.Н.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В статье рассматриваются вопросы определения оптимальных параметров автоматизированной системы технического обслуживания (АСТО) сложного объекта радиоэлектронной техники (РЭТ) на этапе его разработки. В качестве параметров АСТО используются параметры возможных стратегий технического обслуживания (ТО). Оптимальные параметры АСТО определяются на основе применения специального программного обеспечения, в котором реализованы модели оптимизации параметров различных стратегий ТО объекта РЭТ.

Разработана методика определения оптимальных параметров АСТО, позволяющая выбрать подходящие стратегии ТО и определить их оптимальные параметры. Оптимизация производится по критерию минимума удельной стоимости эксплуатации объекта при условии обеспечения требуемого уровня его безотказности.

Рассмотрены вопросы возможной аппаратно-программной реализации АСТО. Приведен пример, иллюстрирующий применение методики для простого тестового объекта РЭТ.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, стратегия технического обслуживания, оптимизация параметров стратегии технического обслуживания, показатели надежности и стоимости эксплуатации.

Procenko Y.M.

PARAMETRIC SYNTHESIS OF AN AUTOMATED MAINTENANCE SYSTEM FOR A COMPLEX RADIOELECTRONIC TECHNOLOGY OBJECT

The article considers issues of determination of optimal parameters of the automated maintenance system (AMS) complex radioelectronic technology object (RET) at the stage of its development. As parameters of AMS are used the parameters of possible strategies of the technical maintenance (TM). The optimal parameters of AMS are determined on the basis of the use of special software that implements the optimization model of the parameters of different strategies TM for the RET object.

The methodology of determining the optimal parameters of AMS is developed, it allows to select suitable strategies and determine their optimal parameters. Optimization is performed by the minimum unit cost of the operation of the object while ensuring the required level of reliability.

Considered the issues of possible hardware and software implementation of AMS. An example that illustrates the application of the method for a simple test of the RET object.

Keywords: maintenance and repair, maintenance strategy optimization of parameters of maintenance strategy, reliability and operation cost.