

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С.В. Ленков¹, А.В. Селюков², В.В. Зубарев³, В.Н. Цыцарев¹

¹ Военный институт Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
ул. Ломоносова, 81, Киев, 03680, Украина; e-mail: lenkov_s@ukr.net

² Государственное предприятие «Научный центр точного машиностроения»,
ул. Бориспольская, 9, Киев, 02099, Украина; e-mail: selukov@3g.ua

³ Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники ВС Украины,
Киев, Украина

Предложены методика и алгоритм решения задачи определения оптимальных параметров технического обслуживания по состоянию сложных объектов радиоэлектронной техники. Задача оптимизации ставится как задача минимизации удельной стоимости эксплуатации объекта при заданном ограничении на минимально допустимый уровень безотказности объекта.

В качестве оптимизируемых параметров процесса технического обслуживания по состоянию приняты: 1) множество обслуживаемых элементов объекта, 2) уровни предельно допустимых значений определяющих параметров обслуживаемых элементов, и 3) периодичность контроля технического состояния объекта.

Целевые функции задачи – удельная стоимость эксплуатации и средняя наработка на отказ объекта получаются с помощью имитационной статистической модели. Задача решается приближенно с использованием разработанного программного обеспечения. В поиске оптимального решения принимает участие в интерактивном режиме человек-эксперт. Приводится пример решения задачи.

Ключевые слова: техническое обслуживание, радиоэлектронная техника, эксплуатация

Введение

Техническое обслуживание (ТО) для сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) является одним из средств обеспечения требуемого уровня надежности объектов в процессе эксплуатации. Если требуемый уровень надежности обеспечивается и без всякого ТО, то вопрос о необходимости ТО вообще снимается. Однако для многих типов сложных объектов РЭТ проблема обеспечения их надежности все же остается актуальной, несмотря на применение современной элементной базы и новых технологий разработки и изготовления аппаратуры. Для таких объектов разработчик всегда стремится использовать все возможные меры для повышения надежности, в том числе и ТО. В этих случаях разработчику важно знать, какая потенциально возможная прибавка в уровне надежности объекта может быть получена за счет ТО и какие дополнительные стоимостные затраты для этого могут потребоваться.

Задача состоит в следующем: для заданного типа объекта РЭТ с известными составом, структурой, надежностными и стоимостными характеристиками требуется

определить оптимальные параметры системы ТО (СТО). Оптимальные параметры СТО должны обеспечивать заданный уровень надежности объекта при минимальных затратах на его эксплуатацию. Задачу будем решать для стратегии ТО «по состоянию» (ТОС), которая считается потенциально наиболее эффективной. Однако для практической реализации стратегии ТОС конструкция объекта должна быть приспособлена для этого, в частности, необходимо, чтобы для обслуживаемых элементов существовали измеряемые определяющие параметры (ОП).

Процесс ТО, организованный в соответствии со стратегией ТОС, должен протекать следующим образом. В процессе эксплуатации производится периодический контроль технического состояния (ТС) обслуживаемых элементов. Если в результате контроля оказывается, что ТС элемента не соответствует требуемому, выполняется ТО (или замена) этого элемента.

Обозначим $E_{\text{то}} = \{e_i\}$ множество обслуживаемых элементов объекта, и будем полагать, что для всех обслуживаемых элементов существуют ОП. Нормированное значение ОП, измеренное в момент времени t , будем обозначать $u_i(t)$. Величина $u_i(t)$ может принимать значения в диапазоне $[0,1]$, значение $u_i(t) = 0$ соответствует номинальному значению ОП, значение $u_i(t) = 1$ является критическим, при достижении которого наступает отказ элемента. Для каждого элемента $e_i \in E_{\text{то}}$ задается уровень ТО $u_{\text{то}i}$ такой, что если при контроле оказывается, что $u_i(t) \geq u_{\text{то}i}$, то производится замена элемента e_i .

С учетом введенных обозначений и понятий постановку задачи оптимизации параметров ТОС запишем формально следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} T_0(E_{\text{то}}^*, U_{\text{то}}^*, T_k^*) &\geq T_0^{\text{тп}}, \\ c_0(E_{\text{то}}^*, U_{\text{то}}^*, T_k^*) &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$T_0^{\text{тп}}$ — заданное требуемое значение средней наработки на отказ объекта;

$E_{\text{то}}^*$, $U_{\text{то}}^*$ и T_k^* — искомые оптимальные значения параметров ТОС: $E_{\text{то}}$ — множество обслуживаемых элементов; $U_{\text{то}} = \{u_{\text{то}i}; i = \overline{1, |E_{\text{то}}|}\}$ — вектор уровней ТО $u_{\text{то}i}$; T_k — периодичность контроля объекта.

Сложность решения данной задачи обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых – это сложная структура пространства, в котором должен осуществляться поиск оптимальных значений $E_{\text{то}}^*$, $U_{\text{то}}^*$ и T_k^* . Пространство это представляет собой декартово произведение

$$\{E_{\text{то}}\} \times [0,1]^{|E_{\text{то}}|} \times [0, \infty), \quad (2)$$

где

$\{E_{\text{то}}\}$ — множество всех множеств $E_{\text{то}}$, где $E_{\text{то}}$ — множество потенциально обслуживаемых элементов ($E_{\text{то}}^* \subseteq E_{\text{то}}$);

$[0,1]^{|E_{\text{то}}|}$ — гиперкуб, каждая точка в котором представляет собой вектор размерностью $|E_{\text{то}}|$, элементами вектора являются числа, принадлежащие отрезку $[0,1]$;

$[0, \infty)$ — числовая ось, содержащая все положительные числа.

Во-вторых, особенностью задачи (1), осложняющей ее решение, является то, что для ее целевых функций T_0 и c_3 неизвестны аналитические выражения, их значения в отдельных точках могут быть получены только путем моделирования [2]. С учетом этого очевидно, что можно рассчитывать, по всей видимости, только на приближенное решение задачи (1).

В данной статье предлагается методика приближенного решения задачи (1), представленная описываемым ниже алгоритмом. Алгоритм основан на применении имитационной статистической модели (ИСМ) [2].

Алгоритм решения задачи

Структурная схема алгоритма решения задачи (1), приведена на рис. 1. Исходной информацией для алгоритма являются вся информация об объекте РЭТ, которая используется ИСМ [2], дополнительно также задаются множество потенциально обслуживаемых элементов $E_{\text{ТО}}$ и требуемое значение средней наработки на отказ объекта $T_0^{\text{ТР}}$.

Оператор 1 создает множества $E_{\text{ТО}i}^+$ и $U_{\text{ТО}i}^+$ (вначале пустые), и иницирует переменную i , которая используется для подсчета числа выполненных шагов поиска решения (одновременно переменная i является номером элемента e_i , который добавлен в множество $E_{\text{ТО}i}^+$ последним). Множество $E_{\text{ТО}i}^+$ используется в качестве текущего множества обслуживаемых элементов (в него на каждом шаге будет добавляться один элемент, взятый из множества $E_{\text{ТО}}$). Множество (вектор) $U_{\text{ТО}i}^+$ используется для запоминания найденных оптимальных значений уровней ТО $u_{\text{ТО}i}^+$ элементов, уже включенных в множество $E_{\text{ТО}i}^+$.

Оператор 2 формирует номер i очередного (текущего) шага процесса поиска.

Оператор 3 выбирает из множества $E_{\text{ТО}}$ i -й элемент e_i и добавляет его в множество $E_{\text{ТО}i}^+$. Выбор элементов e_i из $E_{\text{ТО}}$ производится в порядке возрастания их средней наработки до отказа.

Оператор 4 строит (программно) графики функций $u_{\text{ТО}i}^+(T_k)$ и $c_3^+(T_k)$ в зависимости от периодичности ТО T_k . $u_{\text{ТО}i}^+(T_k)$ — это оптимальное значение уровня ТО для i -го элемента, найденное из условия:

$$u_{\text{ТО}i}^+(T_k): c_3(E_{\text{ТО}i}^+, U_{\text{ТО}i}^+, T_k) \rightarrow \min_{u_{\text{ТО}i} \in U_{\text{ТО}i}^+}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ТО}i}^+ = \{u_{\text{ТО}1}^*, \dots, u_{\text{ТО}i-1}^*, u_{\text{ТО}i}^*\}$ — это вектор, в котором $u_{\text{ТО}1}^*, \dots, u_{\text{ТО}i-1}^*$ — оптимальные значения уровней ТО элементов e_1, \dots, e_{i-1} , найденные в предыдущих шагах, а $u_{\text{ТО}i}$ — варьируемый уровень ТО для элемента e_i , оптимальное значение которого должно быть найдено в соответствии с условием (3).

Величина $c_3^+(T_k)$ — это удельная стоимость эксплуатации, получаемая при оптимальном значении уровня ТО $u_{\text{ТО}i}^+(T_k)$:

$$c_3^+(T_k) = c_3(E_{\text{ТО}i}^+, U_{\text{ТО}i}^+, T_k). \quad (4)$$

Вектор $U_{\text{то}}^+$ в (4) отличается от $U_{\text{то}i}^*$ только тем, что в $U_{\text{то}}^+$ в качестве i -ой компоненты подставлено найденное условно оптимальное значение $u_{\text{то}i}^+(T_k)$.

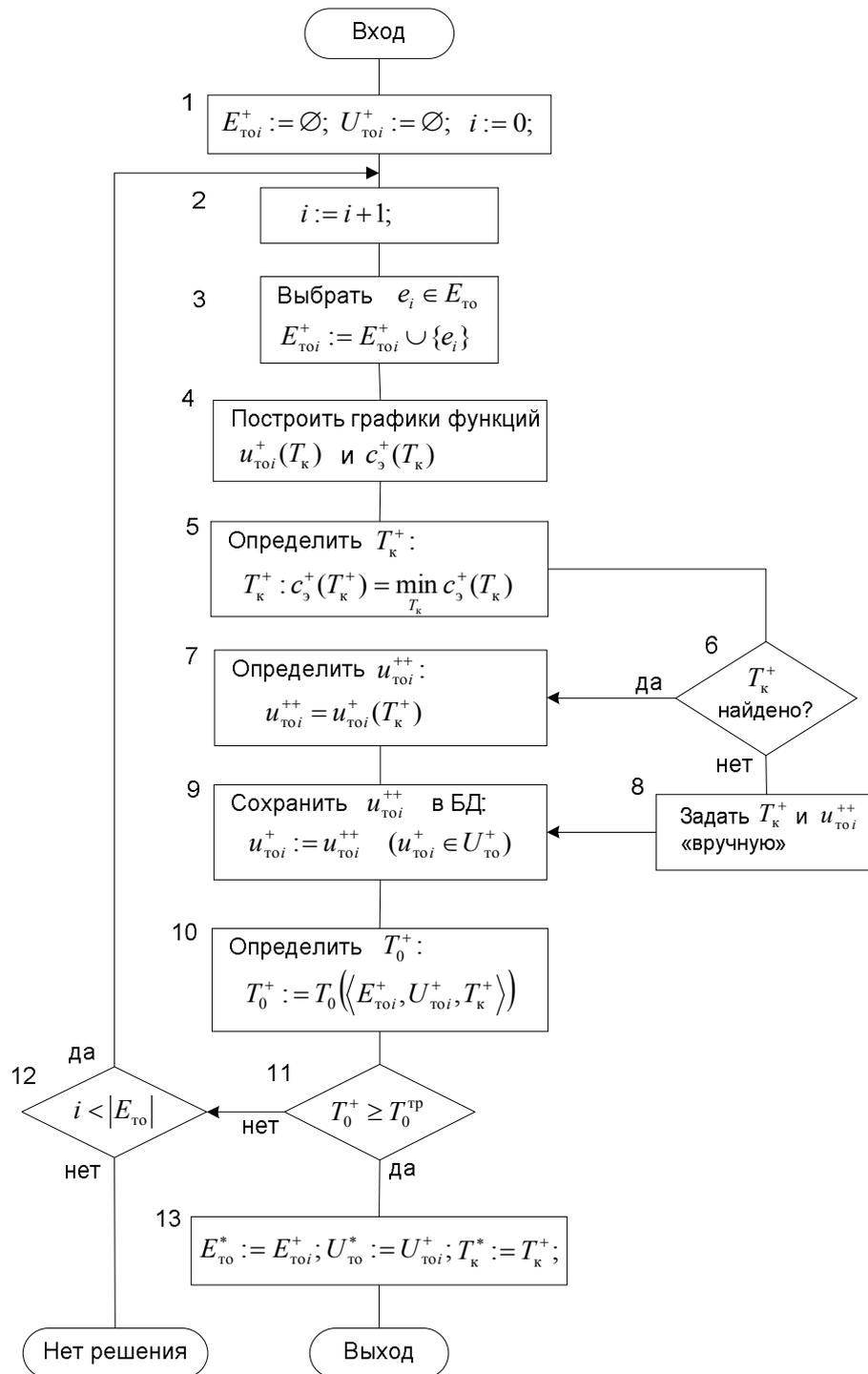


Рис. 1. Алгоритм поиска оптимальных параметров стратегии ТОС

Оператор 5 определяет оптимальное в текущем шаге (условно оптимальное) значение периодичности контроля T_k^+ , удовлетворяющее условию:

$$c_3^+(T_k^+) = \min_{T_k} c_3^+(T_k). \quad (5)$$

Если величина T_k^+ найдена, то далее выполняется оператор 7, который определяет оптимальное значение уровня ТО u_{toi}^{++} :

$$u_{toi}^{++} = u_{toi}^+(T_k^+) \quad (6)$$

(здесь «++» подчеркивает тот факт, что значение u_{toi}^{++} относится к найденному оптимальному значению T_k^+).

Оператор 9 найденное значение u_{toi}^{++} сохраняет в БД в качестве оптимального значения, и тем самым подготавливает БД к расчетам в последующих шагах.

На данной стадии расчетов мы получаем условно оптимальное решение задачи:

$$\langle E_{toi}^+, U_{toi}^+, T_k^+ \rangle.$$

В некоторых случаях минимум у функции $c_3^+(T_k)$ может отсутствовать. В этих случаях в процесс вмешивается эксперт, который по графикам $c_3^+(T_k)$ и $T_0^+(T_k)$ выбирает приемлемое значение T_k^+ и соответствующее ему значение $T_0^+(T_k^+)$. Величина u_{toi}^{++} , соответствующая выбранному T_k^+ , определяется по графику $u_{toi}^+(T_k)$. Эти действия эксперта на схеме алгоритма представлены операторами 6 и 8.

Оператор 10 определяет достигнутое в i -м шаге поиска значение средней наработки на отказ объекта T_0^+ :

$$T_0^+ = T_0(\langle E_{toi}^+, U_{toi}^+, T_k^+ \rangle).$$

Оператор 11 проверяет выполнение условия $T_0^+ \geq T_0^{TP}$. Если это условие выполняется, то полученное условно оптимальное решение $\langle E_{toi}^+, U_{toi}^+, T_k^+ \rangle$ принимается в качестве окончательного решения задачи (оператор 13). Процесс поиска решения в этом случае завершается.

В противном случае, если $T_0^+ < T_0^{TP}$, выполняется оператор 12, который проверяет, все ли элементы из $E_{то}$ были использованы при поиске решения. Если нет ($i < |E_{то}|$), то оператор 12 передает управление оператору 2 для продолжения процесса поиска решения.

Если на некотором шаге все элементы, выбираемые из $E_{то}$, будут исчерпаны ($i = |E_{то}|$), то это будет означать, что исходная задача (1) не имеет решения – заданное требование T_0^{TP} за счет ТО не может быть обеспечено. Полученное на последнем шаге значение средней наработки на отказ T_0^+ – это, по-видимому, максимальное ее значение, которое может быть достигнуто за счет проведения ТОС.

Данный алгоритм реализован программно в рамках программы ISMPN [2]: в программе для этого введен дополнительно режим **Оптимизация ТО | ТО “по состоянию”**.

Для примера воспользуемся тестовым объектом, который мы уже использовали в [2]. Конструктивная структура объекта показана на рис. 2. Составные элементы на рисунке изображены прямоугольниками, простые – кружками. Рядом со значками простых элементов цифрой показано количество однотипных комплектующих элементов (КЕ), входящих в данный элемент. Все простые элементы состоят из одинаковых КЕ, с характеристиками надежности: средняя наработка до отказа $T_{cp} = 20000$ ч; коэффициент вариации $\nu = 0.8$; DN -распределение наработки до отказа [3].

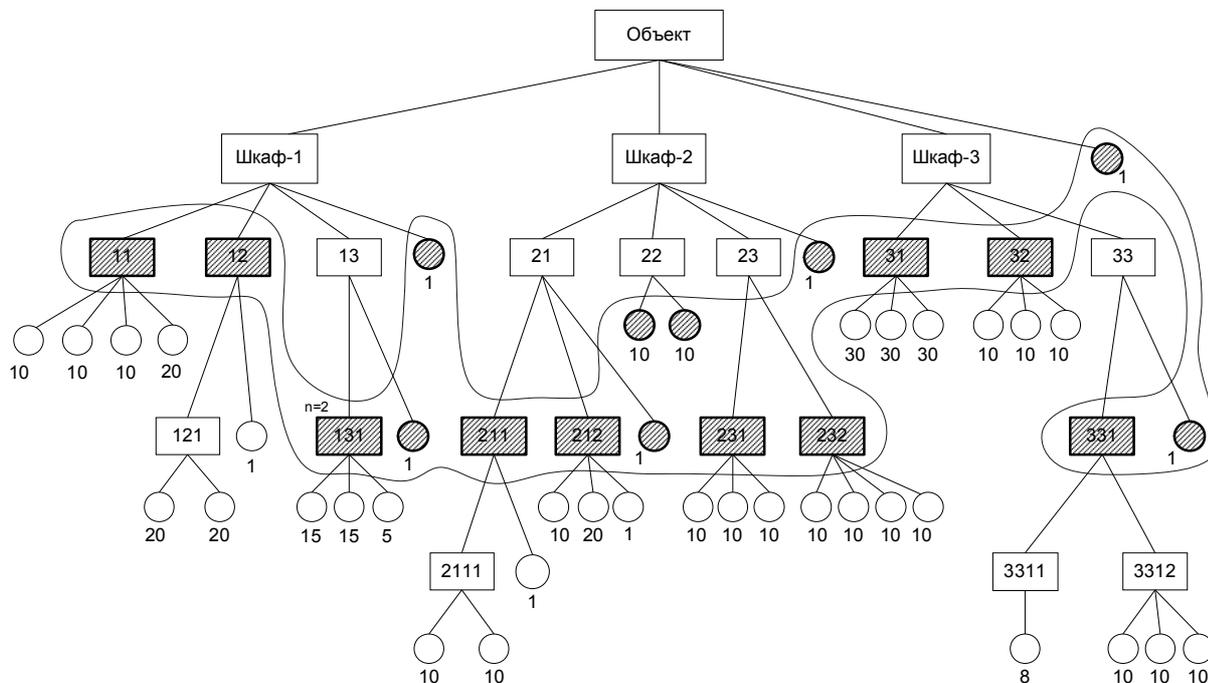


Рис. 2. Конструктивная структура тестового объекта

Подмножество отказывающихся элементов E_o отмечено на рисунке штриховкой. В множество потенциально обслуживаемых элементов $E_{то}$ включим 5 наименее надежных элементов из E_o . Данные об элементах $E_{то}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики потенциально обслуживаемых элементов тестового объекта

Номер элемента	Наименование элемента	Средняя наработка до отказа $T_{срi}$, ч	Стоимость элемента C_{0i} , у.е.
1	31	2108	900
2	331	2425	680
3	11	2828	500
4	12	3123	410
5	131	3380	350

Моделирование будем производить на интервале эксплуатации $T_s = 20$ лет. В результате моделирования для случая, если ТО не проводится, были получены следующие значения показателей:

$$T_0 = 277 \text{ ч}, \quad c_3 = 1.468 \text{ у.е./ч}, \quad K_{\text{ти}} = K_{\Gamma} = 0.99278.$$

Зададим требуемое значение средней наработки на отказ $T_0^{\text{TP}} = 400 \text{ ч}$.

В соответствии с приведенным алгоритмом расчеты произведем в следующей последовательности:

На 1-м шаге (в 1-м цикле исполнения алгоритма рис. 1) в множество $E_{\text{то}}^+$ включим элемент 31: $E_{\text{то1}}^+ = \{31\}$.

Запустим программу ISMPN в режиме **Оптимизация ТО | ТО “по состоянию”**. Для поиска условно оптимальных значений $u_{\text{тоi}}^+$ и $T_{\text{к}}^+$ зададим следующие интервалы варьирования параметров:

- для $u_{\text{то}}$: от 0,4 до 0,8 с интервалом 0,05;
- для $T_{\text{к}}$: от 100 до 500 ч с интервалом 20 ч.

После завершения моделирования вид экрана ПК будет примерно таким, как это показано на рис. 3.

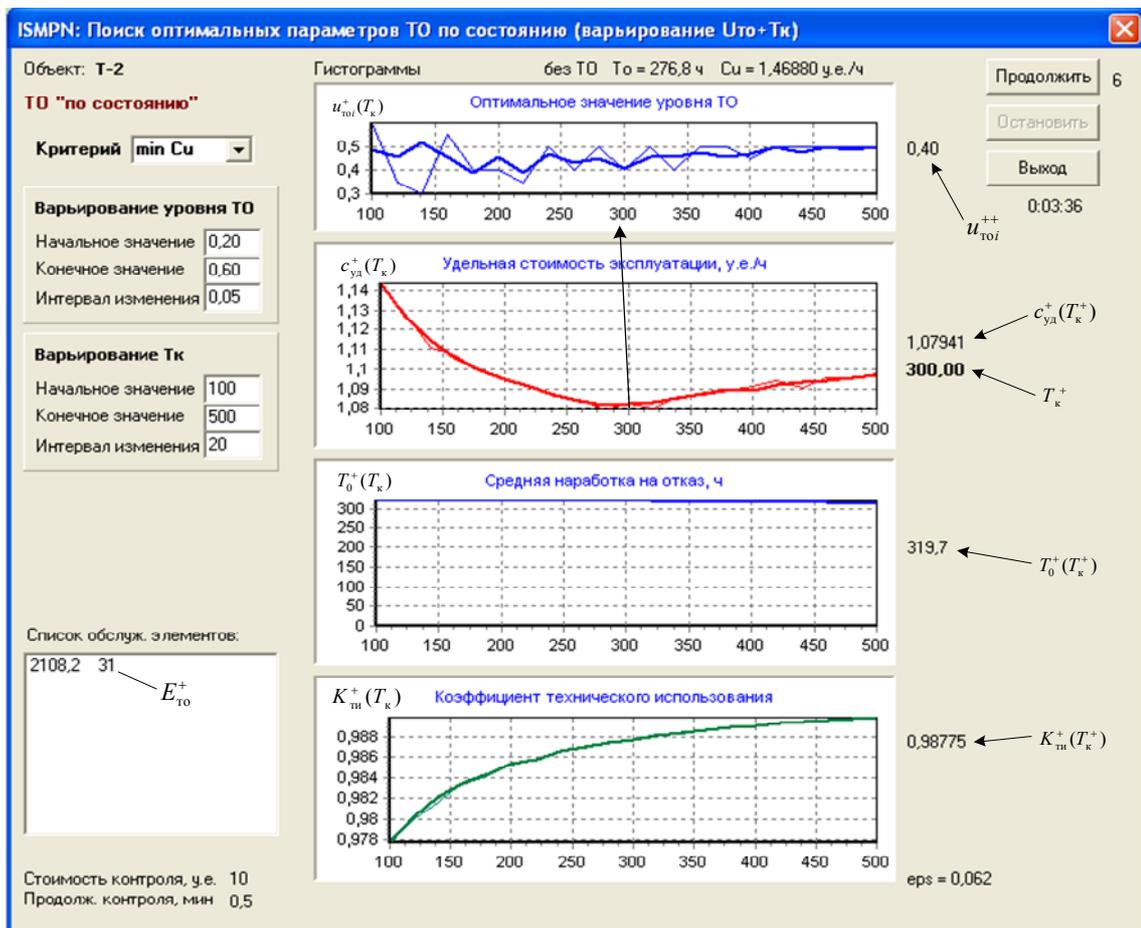


Рис. 3. Вид экрана ПК после завершения расчетов на 1-м шаге

По графику функции $c_3^+(T_{\text{к}})$ определяем ее минимальное значение $c_3^+(T_{\text{к}}^+) = 1.07941$ и соответствующее ему оптимальное значение $T_{\text{к}}^+ = 300 \text{ ч}$. По графику $u_{\text{тоi}}^+(T_{\text{к}})$ определяем оптимальное значение $u_{\text{то1}}^+ = u_{\text{тоi}}^+(T_{\text{к}}^+) = 0.45$. Таким образом, в

результате выполнения расчетов на 1-м шаге получаем следующее условно оптимальное решение:

$$\langle E_{\text{то1}}^+, U_{\text{то1}}^+, T_{\text{к}}^+ \rangle = \langle \{31\}, \{0,45\}, 300 \text{ ч} \rangle.$$

По графику $T_0^+(T_{\text{к}})$ определяем достигнутое значение средней наработки на отказ $T_0^+ = 319$ ч. Сравнивая полученное значение $T_0^+ = 319$ ч с требуемым значением $T_0^{\text{тп}} = 400$ ч, приходим к выводу, что заданное требование не выполняется. Значит необходимо продолжить расчеты и перейти к выполнению следующего шага. Но перед этим необходимо открыть БД и для элемента 31 ввести полученное для него условно оптимальное значение уровня ТО $u_{\text{то1}}^{++}$.

Аналогичным образом произведем расчеты на всех последующих шагах, последовательно включая в множество $E_{\text{то}(i)}^+$ все элементы из $E_{\text{то}}$ (всего 5 шагов). Для экономии места не будем приводить все промежуточные результаты. Приведем только окончательные данные условно оптимальных решений, полученных на каждом шаге. Данные сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты расчетов условно оптимальных параметров ТОС для тестового объекта

Номер шага i	Условно оптимальные параметры $\langle E_{\text{то}i}^+, U_{\text{то}i}^+, T_{\text{к}}^+ \rangle$			Значения показателей, получаемые при условно оптимальных параметрах			
	$E_{\text{то}i}^+$	$u_{\text{то}i}^{++}$	$T_{\text{к}}^+, \text{ ч}$	$T_0^+, \text{ ч}$	$c_s^+, \text{ у.е./ч}$	$K_{\text{ти}}^+$	ε
0	–	–	–	277	1,46880	0,99278	0,060
1	{31}	0,40	300	319	1,07941	0,98775	0,062
2	{31,331}	0,45	280	366	0,80331	0,98755	0,075
3	{31,331,11}	0,42	260	422	0,63401	0,98725	0,072
4	{31,331,11,12}	0,50	280	483	0,50673	0,98784	0,083
5	{31,331,11,12,131}	0,50	280	568	0,40421	0,98789	0,081

По полученным данным видно, что требование $T_0^{\text{тп}} = 400$ ч выполняется уже на 3-м шаге, с учетом этого в рассматриваемом примере получаем следующее решение задачи (1):

$$\langle E_{\text{то}}^*, U_{\text{то}}^*, T_{\text{к}}^* \rangle = \langle \{31, 331, 11\}; \{0.40; 0.45; 0.42\}, 260 \text{ ч} \rangle.$$

При полученных оптимальных параметрах ТОС будут обеспечиваться следующие значения показателей:

$$T_0 = 422 \text{ ч}, \quad c_s = 0.63401 \text{ у.е./ч}, \quad K_{\text{ти}} = 0.98725.$$

Статистическая ошибка результатов моделирования (относительная ошибка оценки T_0), при которой получены эти результаты, равна $\varepsilon = 0.072$.

Выводы

1) Рассмотренные алгоритм и методика позволяют решать поставленную задачу определения оптимальных параметров ТОС с приемлемой для практики точностью.

2) Разработанное программное обеспечение для решения данной задачи может применяться при разработке объектов РЭТ в качестве адекватного инструмента для прогнозирования показателей их эксплуатационной надежности с учетом проведения ТОС.

3) Получаемые прогнозные оценки показателей T_0 , c_3 и $K_{ти}$ являются оптимистическими (завышенными) вследствие того, что алгоритм моделирования основан на допущении о существовании и возможности измерения ОП для всех обслуживаемых элементов объекта. На практике такое допущение, к сожалению, далеко не всегда можно реализовать.

Список литературы

1. Моделирование и оптимизация процессов технического обслуживания сложных объектов радиоэлектронной техники: Монография / Ю.В. Березовская, К.Ф. Боряк, В.О. Браун, С.В. Ленков, В.А. Осыпа, С.А. Пашков, В.Н. Цыцарев и др.; под ред. С.В. Ленкова. — 1-е издание. — Николаев: Сент-Гросс, 2012. — 150 с.
2. Ленков, С.В. Прогнозирование показателей надежности и стоимости эксплуатации сложных объектов РЭТ с использованием имитационной статистической модели / С.В. Ленков, В.О. Браун, В.А. Осыпа и др. // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. — К., 2013. — № 43. — С. 22–25.
3. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. — Введ. 01.01.99. — 45 с.

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА СТАНОМ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

С.В. Ленков¹, О.В. Селюков², В.В. Зубарев³, В.М. Цыцарев¹

¹ Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, вул. Ломоносова, 81, Київ, 03680, Україна; e-mail: lenkov_s@ukr.net

² Державне підприємство «Науковий центр точного машинобудування», вул. Бориспільська, 9, Київ, 02099, Україна; e-mail: selukov@3g.ua

³ Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки ЗС України, Київ, Україна

Запропоновано методику та алгоритм розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів технічного обслуговування за станом складних об'єктів радіоелектронної техніки. Завдання оптимізації розглядається як завдання мінімізації питомої вартості експлуатації об'єкта при заданому обмеженні на мінімально допустимий рівень безвідмовності об'єкта.

В якості оптимальних параметрів процесу технічного обслуговування за станом прийняті: 1) безліч обслуговуваних елементів об'єкта, 2) рівні гранично допустимих значень визначальних параметрів обслуговуваних елементів, та 3) періодичність контролю технічного стану об'єкта.

Цільові функції завдання – питома вартість експлуатації та середнє напрацювання на відмову об'єкта виходять за допомогою імітаційної статистичної моделі. Задача вирішується з використанням розробленого програмного забезпечення. У пошуку оптимального рішення приймає участь в інтерактивному режимі людина-експерт. Наводиться приклад розв'язання задачі.

Ключові слова: технічне обслуговування, радіоелектронна техніка, експлуатація

DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS OF MAINTENANCE AS FOR THE CONDITION OF COMPOUND FACILITIES OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Sergey V. Lenkov¹, Oleksandr V. Selyukov², Valery V. Zubarev³, Vadim M. Tsytsaryev¹

¹ Military Institute, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 81 Lomonosov str., Kyiv, 03680, Ukraine; e-mail: lenkov_s@ukr.net

² Scientific center of precision engineering, State enterprise, 9 Boryspilska str., Kyiv, 02099, Ukraine; e-mail: selukov@3g.ua

³ Central Research Institute of weapons and military equipment, Kyiv, Ukraine

The methods and algorithm for problem solving concerning the determination of the optimal parameters of maintenance as for the condition of compound facilities of radio electronic equipment were proposed. The optimization problem is set as a problem of minimizing the cost factor of the facility maintenance given the restriction to minimum permissible level of the facility reliability.

As the optimal parameters of the maintenance process as for the condition the following was accepted: 1) a lot of facility's elements being maintained, 2) levels of maximum allowable values of the determining parameters of the elements being maintained, and 3) the frequency of monitoring the technical condition of the facility.

The target functions of the problem, that is the cost factor of maintenance and the average time between failures, are being obtained by using simulation statistical model. The problem is being solved approximately by using the developed software. A person-expert participates in the search for optimal solutions interactively. An example of solving the problem is given.

Keywords: maintenance, radio electronic equipment, exploiting