

УДК 681.3(07)

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ “ПО СОСТОЯНИЮ” С АДАПТИВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТА

Банзак Г. В. (ДП НЦТМ),

Селюков А. В., Цыцарев В. Н. (Військ. ін-ст Київськ. нац. унів-ту ім. Т. Шевченка)

Предложена методика приближенного решения задачи определения оптимальных параметров ТО “по состоянию” с адаптивным изменением периодичности контроля объекта. Оптимизация производится по критерию минимума удельной стоимости эксплуатации. Для получения оценок целевых функций – средней наработки на отказ и удельной стоимости эксплуатации, используется имитационная статистическая модель.

Техническое обслуживание (ТО) является важнейшей составляющей процесса эксплуатации сложных технических объектов длительного многократного применения. Существуют различные стратегии проведения ТО, из которых наиболее эффективными считаются стратегии ТО “по состоянию” [1, 2]. В [3] была рассмотрена стратегия ТО “по состоянию” с адаптивным изменением периодичности контроля и разработанная для нее имитационная статистическая модель процесса ТО. Стратегию ТО “по состоянию” с адаптивным изменением периодичности контроля для краткости будем называть адаптивной стратегией ТО “по состоянию” (АТОС). Рассмотрим основные положения, определяющие суть стратегии АТОС.

Для обслуживаемого объекта определяется (задается) подмножество конструктивных элементов  $E_{\text{ТО}}$ , для которых имеются измеряемые определяющие параметры, характеризующие техническое состояние (ТС) элементов. Предполагается, что в обслуживаемом объекте имеется встроенная (или внешняя) система технического диагностирования (СТД), в которой реализованы аппаратные и программные средства для измерения и накопления данных определяющих параметров всех элементов  $e_i \in E_{\text{ТО}}$ . Согласно стратегии АТОС ТО проводится в запланированные моменты времени  $t_k$ , в которые производится контроль ТС всех элементов  $E_{\text{ТО}}$  путем измерения значений определяющих параметров. Обозначим  $u_i(t)$  абсолютное значение определяющего параметра, нормированное относительно его предельно допустимого значения, при котором возникает отказ элемента ( $u_i(t) \in [0, 1]$ ). Значение  $u_i(t) = 0$  соответствует номинальному значению параметра. При  $u_i(t) = 1$  возникает отказ элемента.

Если в момент контроля  $t_k$  значение определяющего параметра  $u_i(t_k)$  достигло или превысило значение уровня ТО  $u_{\text{ТО}i}$ , то производится замена  $i$ -го элемента. В момент времени  $t_k$  определяется средняя скорость деградации ТС  $i$ -го элемента по формуле:

$$a_i(t_k) = u_i(t_k) / (t_k - t_{0i}), \quad (1)$$

где  $t_{0i}$  - момент времени (значение наработки) последней замены  $i$ -го элемента ( $t_{0i} < t_k$ ).

В момент контроля  $t_k$  вычисляется и сохраняется в памяти СТД прогнозируемое значение средней скорости деградации ТС  $i$ -го элемента  $\tilde{a}_i(t_k)$ . Величина  $\tilde{a}_i(t_k)$  рассчитывается по формуле:

$$\tilde{a}_i(t_k) = \beta \tilde{a}_i(t_{k-1}) + (1 - \beta) a_i(t_k), \quad (2)$$

где  $t_{k-1}$  - момент времени предыдущего контроля ( $k = 1, 2, \dots$ );

$\beta$  - постоянная сглаживания ( $\beta \in [0, 1]$ ).

Выражение (2) представляет собой известную модель экспоненциального сглаживания, которая используется для оценки средних при обработке данных временных рядов [4]. Случайный характер процессов деградации ТС обуславливает случайность значений определяющих параметров  $u_i(t)$  и модель (2) является вполне адекватной моделью для прогнозирования средней скорости деградации  $\tilde{a}_i(t_k)$ .

По накопленной к моменту времени  $t_k$  информации рассчитывается время следующего контроля  $t_{k+1}$  следующим образом. Принимается допущение о том, что ресурс элементов расходуется линейно, то есть  $a_i(t) = a_i = \text{const}$ . С учетом этого можно рассчитать прогнозируемую в момент времени  $t_k$  оценку средней наработки до отказа всех обслуживаемых элементов:

$$\tilde{T}_{\text{сп}i}(t_k) = 1 / \tilde{a}_i(t_k). \quad (3)$$

Затем рассчитывается время до следующего контроля объекта согласно следующему выражению:

$$\tilde{T}_{\text{то}}(t_k) = \gamma \min_i \tilde{T}_{\text{сп}i}(t_k), \quad (4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент упреждения, смысл которого можно интерпретировать как относительный "запас прочности" для предотвращения возможных отказов объекта в интервалах эксплуатации между очередными ТО.

С учетом (4) время следующего контроля определяется следующим образом:

$$t_{k+1} = t_k + \tilde{T}_{\text{то}}(t_k), \quad (k = 1, 2, \dots). \quad (5)$$

Из рассмотренного содержания процесса АТОС можно определить, что характеризующими его параметрами являются:

⌘ подмножество обслуживаемых элементов  $E_{\text{то}}$ ;

⌘ значения уровней ТО  $u_{\text{то}i}$  для всех элементов  $e_i \in E_{\text{то}}$ ;

– величину коэффициента упреждения  $\gamma$ .

Задача состоит в том, чтобы определить оптимальные значения этих параметров.

Постоянную сглаживания  $\beta$  мы не включили в параметры, так как она не связана непосредственно с процессом ТО, а определяет только способ обработки временных рядов данных измерений определяющих параметров.

**Формальная постановка задачи.** Формально стратегию АТОС будем описывать следующей совокупностью параметров:

$$\mathbf{STO} = \langle E_{\text{то}}, U_{\text{то}}, \gamma \rangle, \quad (6)$$

где  $E_{\text{то}}$  – подмножество обслуживаемых элементов;

$U_{\text{то}} = \{u_{\text{то}i}\}$  – вектор значений уровней ТО обслуживаемых элементов;

$\gamma$  – коэффициент упреждения.

Эффективность стратегии АТОС будем оценивать по показателям надежности и стоимости эксплуатации объекта. В качестве показателей выберем:  $T_0$  – средняя наработка на отказ;  $c_{\text{уд}}$  – удельные затраты стоимости на эксплуатацию объекта. С

учетом этого задачу оптимизации параметров АТОС **STO** можно сформулировать следующим образом. Найти такие параметры **STO\***, при которых затраты на эксплуатацию объекта будут минимальными, но при этом будет обеспечиваться

требуемый уровень безотказности объекта. Формально эту постановку задачи можно представить следующими соотношениями:

$$T_0(\mathbf{STO}^*) \geq T_0^{\text{тп}}; c_{\text{уд}}(\mathbf{STO}^*) \rightarrow \min, \quad (7)$$

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

$\mathbf{STO}^* = \langle E_{\text{то}}^*, U_{\text{то}}^*, \gamma^* \rangle$  – искомые оптимальные значения параметров стратегии АТОС.

Задача (7) по структуре полностью аналогична постановке задачи оптимизации параметров ТОС, рассмотренной в [5]. Отличие состоит только в том, что вместо оптимальной периодичности контроля в задаче (7) ищется оптимальное значение коэффициента упреждения  $\gamma^*$ . Поэтому мы не будем здесь приводить подробное обоснование методики, а приведем только сокращенное описание алгоритма решения задачи.

**Алгоритм определения оптимальных параметров АТОС.** Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1. Исходной информацией для алгоритма является информация об обслуживаемом объекте (состав, параметры структуры, показатели безотказности элементов, и др.), а также следующие данные:

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

$E_{\text{то}}$  – множество потенциально обслуживаемых элементов, имеющих измеряемые определяющие параметры.

Работа алгоритма кратко состоит в следующем.

Оператор 1 создает вспомогательные (вначале пустые) множества  $E_{\text{то}}^+$  и  $U_{\text{то}}^+$ , и иницирует переменную  $k$ , которая используется для подсчета числа выполненных

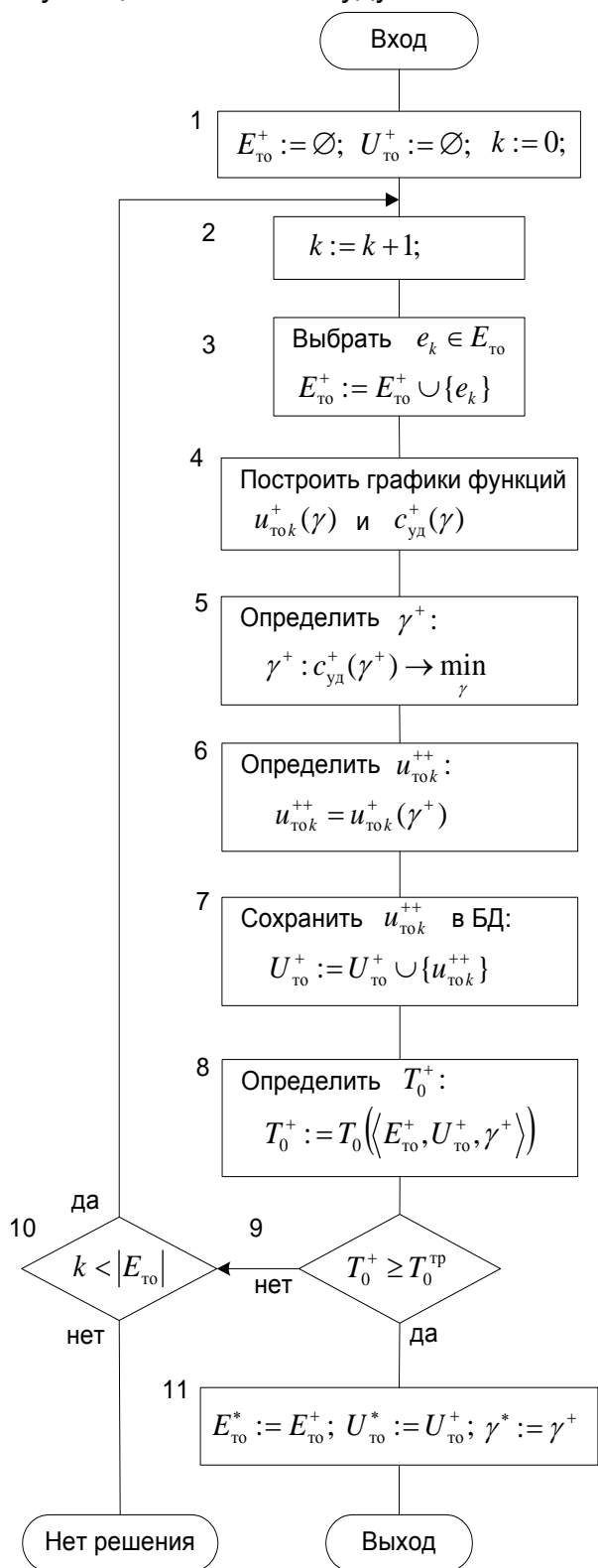


Рис. 1. Структурная схема алгоритма определения оптимальных параметров АТОС

шагов поиска решения. Множество  $E_{\text{ТО}}^+$  используется в качестве текущего множества обслуживаемых элементов (в него на каждом шаге добавляется один элемент, взятый из множества  $E_{\text{ТО}}$ ). Множество  $U_{\text{ТО}}^+$  (вектор) используется для запоминания найденных оптимальных значений уровней ТО  $u_{\text{ТО}k}^*$  элементов, включенных в множество  $E_{\text{ТО}}^+$ .

Оператор 2 формирует номер  $k$  текущего шага процесса поиска.

Оператор 3 выбирает из множества  $E_{\text{ТО}}$   $k$ -й элемент  $e_k$  и добавляет его в множество  $E_{\text{ТО}}^+$ .

Оператор 4 формирует графики функций  $u_{\text{ТО}k}^+(\gamma)$  и  $c_{\text{уд}}^+(\gamma)$  в зависимости от значения коэффициента упреждения  $\gamma$ . Функция  $u_{\text{ТО}k}^+(\gamma)$  – это оптимальное значение уровня ТО элемента  $e_k$ , зависящее от коэффициента  $\gamma$ . Величина  $u_{\text{ТО}k}^+(\gamma)$  определяется из условия:

$$u_{\text{ТО}k}^+(\gamma) : c_{\text{уд}}(E_{\text{ТО}}^+, U_{\text{ТО}}^+, \gamma) \rightarrow \min_{u_{\text{ТО}k}}, \quad (8)$$

где  $U_{\text{ТО}}^+ = \{u_{\text{ТО}1}^*, \dots, u_{\text{ТО}k-1}^*, u_{\text{ТО}k}^+\}$  – это множество (вектор), в котором  $u_{\text{ТО}1}^*, \dots, u_{\text{ТО}k-1}^*$  – оптимальные значения уровней ТО элементов  $e_1, \dots, e_{k-1}$ , найденные в предыдущих шагах, а  $u_{\text{ТО}k}^+$  – оптимальный уровень ТО элемента  $e_k$ , найденный в текущем шаге.

Функция  $c_{\text{уд}}^+(\gamma)$  – это удельная стоимость эксплуатации, получаемая при оптимальном значении уровня ТО  $u_{\text{ТО}k}^+(\gamma)$ :

$$c_{\text{уд}}^+(\gamma) = c_{\text{уд}}(E_{\text{ТО}}^+, U_{\text{ТО}}^+, \gamma). \quad (9)$$

Оператор 5 определяет оптимальное в текущем шаге значение коэффициента упреждения  $\gamma^+$ , удовлетворяющее условию:

$$c_{\text{уд}}^+(\gamma^+) = \min_{\gamma} c_{\text{уд}}^+(\gamma). \quad (10)$$

Оператор 6 определяет оптимальное значение уровня ТО  $u_{\text{ТО}k}^{++}$ :

$$u_{\text{ТО}k}^{++} = u_{\text{ТО}k}^+(\gamma^+). \quad (11)$$

Оператор 7 величину  $u_{\text{ТО}k}^{++}$  сохраняет в БД модели, тем самым подготавливая БД к последующим расчетам.

На данной стадии расчетов получается условно оптимальное решение задачи (оптимальное при условии, что множество обслуживаемых элементов  $E_{\text{ТО}}^+$ ):

$$\mathbf{STO}^+ = \langle E_{\text{ТО}}^+, U_{\text{ТО}}^+, \gamma^+ \rangle.$$

Оператор 8 определяет достигнутое в текущем шаге значение средней наработки на отказ объекта  $T_0^+ = T_0(\mathbf{STO}^+)$ .

Оператор 9 проверяет выполнение условия  $T_0^+ \geq T_0^{\text{тп}}$ . Если условие выполняется, то выполняется оператор 10, который фиксирует окончательное решение:  $\mathbf{STO}^* := \mathbf{STO}^+$ . На этом работа алгоритма завершается.

Если  $T_0^+ < T_0^{\text{тп}}$ , то выполняется оператор 11, который проверяет, все ли элементы из  $E_{\text{ТО}}$  уже использованы. Если нет ( $k < |E_{\text{ТО}}|$ ), то оператор 10 передает управление оператору 2 для продолжения процесса формирования решения.

Данный алгоритм реализован программно (программа ISMPN) в системе программирования Delphi [6]. Целевые функции задачи (7) в программной реализации определяются методом имитационного статистического моделирования. Расчеты производятся с участием человека-эксперта, который после выполнения каждого шага анализирует полученные результаты и принимает решение о прекращении или продолжении поиска.

**Пример решения задачи.** Для примера возьмем простой объект, состоящий из 50 элементов одного конструктивного уровня (такой же, какой использовался в [5]). В смысле надежности все элементы соединены последовательно. Закон распределения наработки до отказа для всех элементов зададим один и тот же – *DN*-распределение [7]. Среднюю наработку до отказа отдельных элементов  $T_{срi}$  зададим произвольно, но так, чтобы распределение значений было примерно равномерным. Средняя наработка до отказа объекта равна  $T_{ср} = 1783$  ч.

В множество потенциально обслуживаемых элементов  $E_{то}$  включены 5 наименее надежных элементов.

Показатели стоимости и ремонтпригодности для всех элементов заданы одинаковыми: *стоимость* одного элемента – 10 у.е.; *стоимость* операций замены и ТО – 1 у.е.; *среднее* время восстановления – 1 ч; *средняя* продолжительность операции ТО – 1 ч.

Стоимость контроля – 1 у.е.; продолжительность контроля – 0,5 ч. Продолжительность эксплуатации объекта задана равной – 20 лет.

Вся эта информация была введена в БД программы ISMPN.

Вначале были произведены расчеты без моделирования ТО. В этом случае были получены следующие значения целевых функций:

$$T_0 = 911 \text{ ч}; c_{уд} = 0,02304 \text{ у.е./ч.}$$

Затем было произведено моделирование ТО. Всего было выполнено 5 шагов расчетов (на каждом шаге в множество  $E_{то}^+$  добавлялся один элемент из множества  $E_{то}$ ). Полученные результаты расчетов условно оптимальных параметров ТОС для тестового объекта представлены в табл. 1.

Табл. 1

Номер шага $k$	Условно оптимальные параметры $STO^+$			Значения целевых функций при параметрах $STO^+$	
	$E_{то}^+$	$u_{тоk}^{++}$	$\gamma^+$	$T_0^+$ , ч	$c_{уд}^+$ , у.е./ч
1	{1}	0,55	0,55	1428	0,01627
2	{1, 2}	0,55	0,5	2883	0,00958
3	{1, 2, 3}	0,55	0,5	5544	0,00640
4	{1, 2, 3, 4}	0,40	0,5	7656	0,00543
5	{1, 2, 3, 4, 5}	0,40	0,5	9353	0,00496

На каждом шаге в результате расчетов на экране ПК отображаются графики  $u_{тоk}^+(\gamma)$ ,  $c_{уд}^+(\gamma)$  и  $T_0^+(\gamma)$ . На рис. 2 для примера приведены такие графики, полученные на первом шаге процесса поиска решения. Если, например, требуемое значение наработки на отказ объекта задать равным  $T_0^{тp} = 5000$  ч, то оптимальным будет решение, полученное на 3 шаге:  $STO^* = \langle \{1,2,3\}; \{0,55; 0,55; 0,55\}; 0,5 \rangle$

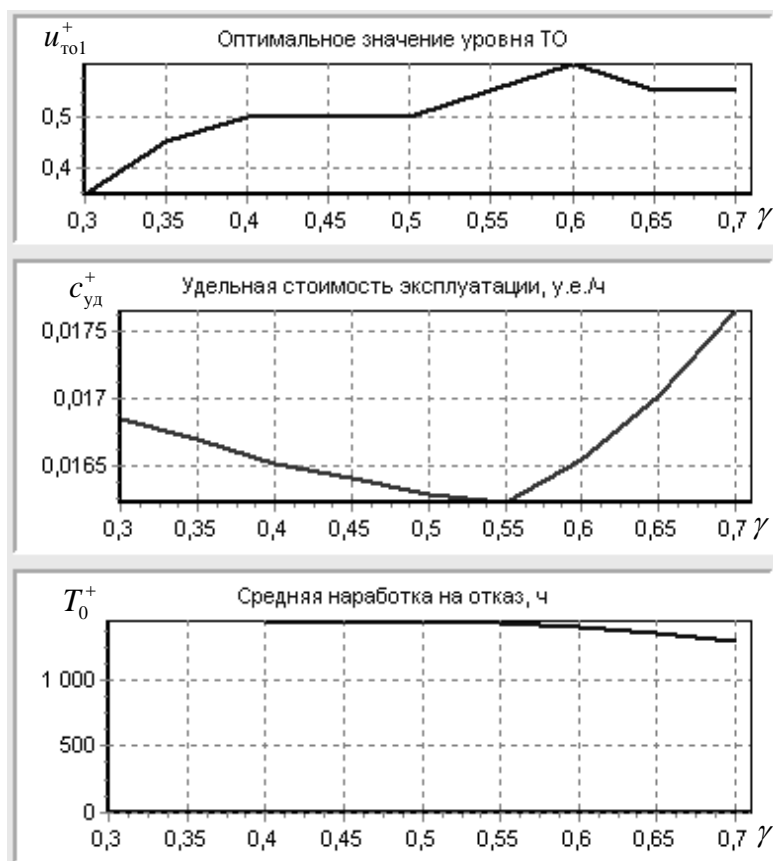


Рис. 2. Графики функций  $u_{\text{ТОк}}^+(T_k)$ ,  $c_{\text{уд}}^+(T_k)$  и  $T_0^+(T_k)$ .

разработанного программного обеспечения, предназначенного для поддержки данной методики.

### Литература

1. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высш. школа, 1982. – 231 с.
2. Надежность и эффективность в технике. Справочник. Т.8. Эксплуатация и ремонт. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
3. Ленков С.В., Цыцарев В.Н., Банзак Г.В. Имитационная статистическая модель адаптивного технического обслуживания сложных технических объектов // Збірник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки. – 2011. – № 19. – С.145 – 154.
4. Теория прогнозирования и принятия решений. Учеб. пособие. Под ред. С. А. Саркисяна. М.: Высш. школа, 1977. – 351 с.
5. Методика определения оптимальных параметров стратегии технического обслуживания “по состоянию” с постоянной периодичностью контроля // Вісник Хмельницького національного університету. – 2011. – № 3. – С.65-71.
6. Дарахвелидзе П.Г., Марков Е.П. Программирование в Delphi 7. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 784 с.
7. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.

По данным табл. 1 определяем, что при оптимальных параметрах  $STO^*$  обеспечиваются следующие значения целевых функций:

$$T_0(STO^*) = 5544 \text{ ч};$$

$$c_{\text{уд}}(STO^*) = 0,00640 \text{ у.е./ч.}$$

По полученным результатам видно, как улучшаются показатели  $T_0$  и  $c_{\text{уд}}$  за счет проведения ТО в случае применения стратегии АТОС. Сравнение полученных результатов с данными, приведенными в [5], показывает, что стратегия АТОС является более эффективной, по сравнению со стратегией ТОС с постоянной периодичностью контроля.

**Вывод.** Рассмотренный пример позволяет также сделать вывод о работоспособности