

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ “ПО СОСТОЯНИЮ” С ПОСТОЯННОЙ ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ КОНТРОЛЯ

*Предложена методика приближенного решения задачи определения оптимальных параметров ТО “по состоянию” с постоянной периодичностью контроля. Оптимизация производится по критерию минимума удельной стоимости эксплуатации технического объекта при ограничении на допустимое значение средней наработки на отказ. Оценки целевых функций задачи определяются с использованием имитационной статистической модели.*

*The method of close decision of task of determination of optimum parameters is offered THAT “on the state” with permanent periodicity of control. Optimization is made on the criterion of a minimum of specific running of technical object cost at a limit on the legitimate value of middle work on a refuse. The estimations of objective functions of task are determined with the use of simulation statistical model.*

Ключевые слова: оптимальные параметры, периодичность контроля, техническое обслуживание, система технического диагностирования.

### Содержательная постановка задачи

Техническое обслуживание (ТО) является необходимой составляющей процесса эксплуатации сложных технических объектов длительного применения. Основное предназначение ТО – поддержание требуемого уровня безотказности объекта в течение всего периода его эксплуатации. Далее предполагается, что требуемый уровень безотказности объекта не обеспечивается без проведения ТО.

В настоящее время известны два принципиально различных подхода (принципа) планирования и проведения ТО [1]: ТО “по ресурсу” и ТО “по состоянию”. При ТО “по ресурсу” сроки и объем работ ТО регламентируются эксплуатационной документацией объекта, в которой указываются наработка, по истечении которой требуется проводить ТО, и содержание работ ТО. При ТО “по состоянию”, как правило, регламентируются только сроки проведения ТО, а объем работ зависит от фактического технического состояния (ТС) элементов объекта. Теоретически возможна ситуация, когда ТО сводится только к контролю ТС.

Систему принципов организации и проведения ТО и ремонта принято называть *стратегией ТО* [2]. Наиболее эффективной и перспективной считается стратегия ТО “по состоянию”, так как ее применение обеспечивает более полное использование возможностей по повышению безотказности объекта за счет ТО.

В данной статье предлагается методика определения оптимальных параметров стратегии “ТО по состоянию” (ТОС) с постоянной периодичностью контроля. Но прежде, чем перейти к сути методики, рассмотрим кратко основные особенности технических объектов, для которых эта методика предназначена.

Сложный технический объект обычно имеет иерархическую конструктивную структуру, при которой любой конструктивный элемент состоит из элементов более низкого конструктивного уровня. На нижнем конструктивном уровне находятся элементы, рассматриваемые как одно целое (неразборные элементы). Элемент любого конструктивного может иметь произвольную надежностную структуру (как правило, последовательно-параллельную). Очевидно, что указанные структурные особенности характерны для весьма широкого класса объектов, встречающихся на практике.

В процессе эксплуатации объекта при отказах заменяться могут элементы любого конструктивного уровня. Однако в действительности в процессе эксплуатации заменяется лишь незначительная часть всех элементов. Подмножество элементов, которые с наибольшей вероятностью будут заменяться при отказах объекта, будем называть *подмножеством восстанавливаемых элементов*  $E_B$ . При проектировании объекта разработчик стремится к тому, чтобы наименее надежные восстанавливаемые элементы были, по возможности, легкодоступными и легкоъемными. Этим определяются так называемые  *типовые элементы замены* (ТЭЗ).

Сложные технические объекты практически всегда имеют встроенную (или внешнюю) систему технического диагностирования (СТД). СТД проектируется таким образом, чтобы она обеспечивала глубину диагностирования как минимум до уровня ТЭЗов. Если для объекта выбрана стратегия ТОС, то на СТД дополнительно возлагаются функции контроля ТС обслуживаемых элементов.

Будем полагать, что ТС элемента характеризуется его определяющим параметром. Согласно [3] под *определяющим параметром* понимается физический или функциональный параметр, значение которого определяет работоспособность (или неработоспособность) элемента. Элемент становится неработоспособным, когда его определяющий параметр достигает предельного критического значения. На рис. 1 показаны случайные функции  $u_i(t)$ , описывающие процесс изменения нормированного значения определяющего параметра некоторого  $i$ -го элемента, и функция плотности вероятности отказов этого элемента  $f_i(t)$ . Нормированное значение параметра  $u_i(t)$  определяется следующим образом:

$$u_i(t) = \left| x_i(t) - x_i^0 \right| / \left| x_i^{\text{доп}} - x_i^0 \right|, \quad (1)$$

где  $x_i(t)$  – значение определяющего параметра  $i$ -го элемента, измеренное в момент времени  $t$ ;

$x_i^0$  – номинальное значение определяющего параметра  $i$ -го элемента;

$x_i^{\text{доп}}$  – предельное критическое значение определяющего параметра, при достижении которого возникает отказ  $i$ -го элемента.

Значение нормированного определяющего параметра  $u_{\text{ТО}i}$ , при достижении которого требуется проведение ТО, условимся называть *уровнем ТО*  $i$ -го элемента. Его величина определяется выражением:

$$u_{\text{ТО}i} = \left| x_i^{\text{ТО}} - x_i^0 \right| / \left| x_i^{\text{доп}} - x_i^0 \right|, \quad (2)$$

где  $x_i^{\text{ТО}}$  – значение определяющего параметра  $i$ -го элемента, при достижении которого требуется проведение ТО.

Очевидно, что далеко не все восстанавливаемые элементы имеют измеряемые определяющие параметры. С одной стороны, не для всех элементов существуют или известны определяющие параметры. С другой стороны, измерение какого-либо физического или функционального параметра всегда требует дополнительных затрат (аппаратурных, временных, стоимостных). Поэтому перед разработчиком объекта стоит достаточно сложная задача определения обслуживаемых элементов, для которых нужно указать измеряемые определяющие параметры, разработать технологию ТО, оценить ориентировочно требуемые для этого затраты. Очевидно, что эта задача так же, как и задача выбора стратегии ТО, должна решаться на ранних стадиях проектирования, одновременно с определением функциональной и конструктивной структуры объекта.

Стратегия ТОС с постоянной периодичностью контроля состоит в следующем. В процессе эксплуатации объекта через равные интервалы времени (наработки) производится контроль его ТС. При контроле измеряются значения определяющих параметров  $u_i(t)$  всех обслуживаемых элементов. Если измеренное значение  $u_i(t)$  больше или равно заданному уровню ТО  $u_{\text{ТО}i}$ , то производится замена элемента. Параметрами этой стратегии являются: множество обслуживаемых элементов  $E_{\text{ТО}}$  ( $E_{\text{ТО}} \subset E_B$ ), уровни ТО  $u_{\text{ТО}i}$  ( $i = \overline{1, |E_{\text{ТО}}|}$ ) и периодичность контроля  $T_K$ .

#### Формализация и анализ постановки задачи

С учетом введенных выше обозначений стратегию ТОС с постоянной периодичностью контроля формально представим следующей совокупностью параметров:

$$\mathbf{STO} = \langle E_{\text{ТО}}, U_{\text{ТО}}, T_K \rangle, \quad (3)$$

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

Если в качестве критерия оптимизации параметров ТО принять “стоимостный критерий”, то задачу определения оптимальных параметров стратегии ТОС формально можно представить следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} T_0(\mathbf{STO}^*) &\geq T_0^{\text{ТР}}; \\ c_{\text{уд}}(\mathbf{STO}^*) &\rightarrow \min_{\{\mathbf{STO}\}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{STO}^* = \langle E_{\text{ТО}}^*, U_{\text{ТО}}^*, T_K^* \rangle$  – искомые оптимальные значения параметров стратегии ТОС;

$T_0(\mathbf{STO}^*)$  – средняя наработка на отказ объекта при условии, что проводится ТО с параметрами  $\mathbf{STO}^*$ ;

$c_{\text{уд}}(\mathbf{STO}^*)$  – средние удельные затраты стоимости на эксплуатацию объекта при проведении ТО с параметрами  $\mathbf{STO}^*$ ;

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

$\{\mathbf{STO}\}$  – пространство возможных значений параметров  $\mathbf{STO}$ .

Задача (4) является достаточно сложной оптимизационной задачей, точное решение которой вряд ли представляется возможным. Трудности решения задачи состоят, во-первых, в том, что не известны аналитические зависимости для целевых функций  $T_0(\mathbf{STO})$  и  $c_{\text{уд}}(\mathbf{STO})$ , и, во-вторых, сложной является структура параметра  $\mathbf{STO}$ .

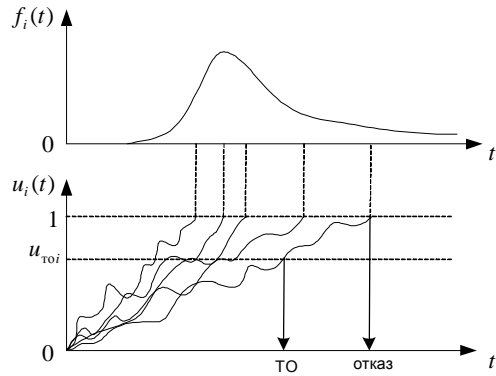


Рис. 1. Механизм возникновения отказов

В рассматриваемой далее методике значения  $T_0(\mathbf{STO})$  и  $c_{уд}(\mathbf{STO})$  определяются с помощью имитационной статистической модели (ИСМ), краткие сведения о которой приводятся в [4].

Согласно (3) пространство  $\{\mathbf{STO}\}$ , в котором производится поиск оптимального решения  $\mathbf{STO}^*$ , является трехмерным. Первое измерение в нем – это множество множеств  $\{E_{TO}\}$ . Второе измерение – это гиперкуб с единичным ребром и числом измерений, равным числу элементов в множестве  $E_{TO}$ . Третье измерение – это числовая ось (положительные значения). Очевидно, что такая структура пространства  $\{\mathbf{STO}\}$  не позволяет применять для решения задачи (4) какие-либо классические методы оптимизации. Здесь требуются нестандартные приемы, максимально учитывающие содержательную специфику задачи. В качестве такого нестандартного приема предлагается следующая схема решения задачи.

Вначале множество  $E_{TO} = \{e_i\}$  упорядочивается по возрастанию средней наработки до отказа элементов  $T_{cpi}$ . Затем задача решается пошагово, путем последовательного включения в множество обслуживаемых элементов (которое будем обозначать  $E_{TO}^+$ ) одного, первых двух, трех и т.д. элементов, выбираемых из упорядоченного множества  $E_{TO}$ . В каждом  $k$ -м шаге производится двумерный поиск условно оптимальных значений  $u_{TOk}^+$  и  $T_k^+$  при условии, что в множество  $E_{TO}^+$  включены  $k$  элементов:

$E_{TO}^+ = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ . Условно оптимальные значения  $u_{TOk}^+$  и  $T_k^+$  находятся из условия:

$$c_{уд}(\langle E_{TO}^+, \{u_{TO1}^+, u_{TO2}^+, \dots, u_{TOk}^+\}, T_k^+ \rangle) = \min_{T_k} \min_{u_{TOk}} c_{уд}(\langle E_{TO}^+, \{u_{TO1}^+, \dots, u_{TOk-1}^+, u_{TOk}^+\}, T_k \rangle). \quad (5)$$

Если в текущем шаге будет получено значение средней наработки на отказ  $T_0(\langle E_{TO}^+, U_{TO}^+, T_k^+ \rangle) \geq T_0^{TP}$ , процесс пошагового поиска прекращается. Полученное условно оптимальное решение  $\langle E_{TO}^+, U_{TO}^+, T_k^+ \rangle$  принимается в качестве оптимального решения  $\langle E_{TO}^*, U_{TO}^*, T_k^* \rangle$ .

Нетрудно видеть, что данная методика основана на допущении о возрастании (не убывании) зависимости уровня безотказности объекта от объема ТО, задаваемом множеством  $E_{TO}$ . Для систем с монотонной надежностной структурой это допущение всегда выполняется.

Далее рассматривается алгоритм, которым реализуется предложенная методика решения задачи (4).

Алгоритм определения оптимальных параметров ТОС

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 2. Исходной информацией для алгоритма является информация об объекте, необходимая для ИСМ (берется из БД модели), а также следующие данные:

$T_0^{TP}$  – требуемое значение средней наработки на отказ объекта;

$E_{TO}$  – множество потенциально обслуживаемых элементов, имеющих измеряемые определяющие параметры.

Работа алгоритма кратко состоит в следующем.

Оператор 1 создает вспомогательные (вначале пустые) множества  $E_{TO}^+$  и  $U_{TO}^+$ , и иницирует переменную  $k$ , которая используется для подсчета числа выполненных шагов поиска решения. Множество  $E_{TO}^+$  используется в качестве текущего множества обслуживаемых элементов (в него на каждом шаге будет добавляться один элемент, взятый из множества  $E_{TO}$ ). Множество  $U_{TO}^+$  (вектор) используется для запоминания найденных оптимальных значений уровней ТО  $u_{TOk}^*$  элементов, включенных в множество  $E_{TO}^+$ .

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

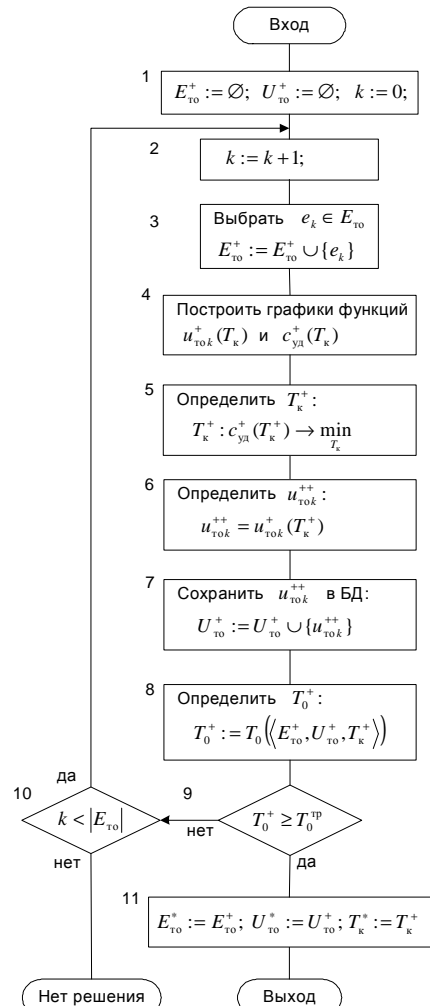


Рис. 2. Структурная схема алгоритма определения оптимальных параметров ТОС

Оператор 3 выбирает из множества  $E_{T_0}$   $k$ -й элемент  $e_k$  и добавляет его в множество  $E_{T_0}^+$ .

Оператор 4 строит (программно) графики функций  $u_{T_0k}^+(T_k)$  и  $c_{уд}^+(T_k)$  в зависимости от периодичности ТО  $T_k$ . Значения  $u_{T_0k}^+(T_k)$  и  $c_{уд}^+(T_k)$  получаются в результате моделирования.  $u_{T_0k}^+(T_k)$  - это оптимальное значение уровня ТО для  $k$ -го элемента, удовлетворяющее условию:

$$u_{T_0k}^+(T_k) : c_{уд}(E_{T_0}^+, U_{T_0}^+, T_k) \rightarrow \min_{u_{T_0k}}, \quad (6)$$

где  $U_{T_0} = \{u_{T_01}^*, \dots, u_{T_0k-1}^*, u_{T_0k}\}$  - это множество (вектор), в котором  $u_{T_01}^*, \dots, u_{T_0k-1}^*$  - оптимальные значения уровней ТО элементов  $e_1, \dots, e_{k-1}$ , найденные в предыдущих шагах, а  $u_{T_0k}$  - варьируемый в текущем шаге уровень ТО для элемента  $e_k$ , оптимальное значение которого находится в соответствии с условием (6).

Вектор  $U_{T_0}^+$  в (6) отличается от  $U_{T_0}$  только тем, что в  $U_{T_0}^+$  в качестве  $k$ -й компоненты подставлено найденное оптимальное значение  $u_{T_0k}^+(T_k)$ .

Величина  $c_{уд}^+(T_k)$  - это удельная стоимость эксплуатации, получаемая при оптимальном значении уровня ТО  $u_{T_0k}^+(T_k)$ :

$$c_{уд}^+(T_k) = c_{уд}(E_{T_0}^+, U_{T_0}^+, T_k). \quad (7)$$

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

$$c_{уд}^+(T_k^+) = \min_{T_k} c_{уд}^+(T_k). \quad (8)$$

Значение  $T_k^+$  в (8) находится методом прямого перебора. Применить здесь более эффективные методы не представляется возможным, так как величина  $c_{уд}^+(T_k)$  является результатом статистического моделирования и содержит неустранимую случайную составляющую.

Оператор 6 определяет оптимальное значение уровня ТО  $u_{T_0k}^{++}$ :

$$u_{T_0k}^{++} = u_{T_0k}^+(T_k^+)^1. \quad (9)$$

Оператор 7 найденное значение  $u_{T_0k}^{++}$  сохраняет в БД, тем самым подготавливая БД модели к последующим расчетам.

На данной стадии расчетов получается *условно оптимальное решение* задачи (оптимальное при условии, если множество обслуживаемых элементов  $E_{T_0}^+$ ):

$$\mathbf{STO}^+ = \langle E_{T_0}^+, U_{T_0}^+, T_k^+ \rangle.$$

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

Оператор 9 проверяет выполнение условия  $T_0^+ \geq T_0^{TP}$ . Если условие выполняется, то полученное условно оптимальное решение  $\mathbf{STO}^+$  принимается в качестве окончательного решения задачи:  $\mathbf{STO}^* := \mathbf{STO}^+$ . Выполняется оператор 11 и на этом процесс поиска решения завершается.

Если  $T_0^+ < T_0^{TP}$ , выполняется оператор 10, который проверяет, все ли элементы из  $E_{T_0}$  были использованы при поиске решения. Если нет ( $k < |E_{T_0}|$ ), то управление передается оператору 2 для продолжения процесса поиска решения.

<sup>1</sup> Двойной значок ++ здесь подчеркивает тот факт, что значение  $u_{T_0k}^{++}$  является “дважды оптимальным” – по  $u_{T_0k}$  согласно (6) и по  $T_k$  согласно (8).

Если на некотором шаге все элементы, выбираемые из  $E_{\text{ТО}}$ , будут исчерпаны ( $k = |E_{\text{ТО}}|$ ), то это будет означать, что исходная задача не имеет решения – заданное требование  $T_0^{\text{ТР}}$  не может быть обеспечено за счет ТО. Для решения задачи в этом случае нужно искать возможности расширить множество потенциально обслуживаемых элементов  $E_{\text{ТО}}$ .

Рассмотренный алгоритм реализован программно в рамках программы ISMPN, в которой используется ИСМ [4]. В решении задачи участвует человек-эксперт, на которого возлагаются функции визуального анализа графиков  $u_{\text{ТО}k}^+(T_k)$  и  $c_{\text{уд}}^+(T_k)$ , выбора диапазона варьирования периодичности контроля  $T_k$  и принятия решения об окончании поиска.

#### Пример решения задачи

Для примера возьмем простой объект, состоящий из 50 элементов, имеющих различную надежность и соединенных в смысле надежности последовательно. Для всех элементов в качестве закона распределения наработки до отказа зададим *DN*-распределение [3]. Среднюю наработку до отказа отдельных элементов  $T_{\text{ср}i}$  зададим произвольно, но так, чтобы распределение значений  $T_{\text{ср}i}$  было примерно равномерным. Коэффициент вариации распределения наработки до отказа для всех элементов зададим равным  $n_i = 0,8$ . При введенных исходных данных средняя наработка до отказа объекта получилась равной  $T_{\text{ср}} = 1783$  ч.

В множество потенциально обслуживаемых элементов  $E_{\text{ТО}}$  были включены 5 наименее надежных элементов.

Для всех элементов заданы одинаковые значения показателей стоимости и ремонтпригодности:

- 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 задана 1 у.е., продолжительность контроля – 0,5 ч.

Продолжительность эксплуатации объекта задана равной  $T_3 = 20$  лет.

Вся эта информация была введена в БД программы ISMPN.

В результате моделирования для случая, если ТО не проводится, были получены такие значения целевых функций:

$$T_0 = 914 \text{ ч}; \quad c_{\text{уд}} = 0,02296 \text{ у.е./ч.}$$

Затем было произведено расчеты в соответствии с приведенным выше алгоритмом. Всего было выполнено 5 шагов расчетов (на каждом шаге в множество  $E_{\text{ТО}}^+$  добавлялся один элемент из множества  $E_{\text{ТО}}$ ). Полученные результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты расчетов условно оптимальных параметров ТОС для тестового объекта

Номер шага $k$	Условно оптимальные параметры $STO^+$			Значения целевых функций при параметрах $STO^+$	
	$E_{\text{ТО}}^+$	$u_{\text{ТО}k}^{++}$	$T_k^+, \text{ ч}$	$T_0^+, \text{ ч}$	$c_{\text{уд}}^+, \text{ у.е./ч}$
1	{1}	0,50	600	1387	0,01741
2	{1, 2}	0,50	500	2717	0,01096
3	{1, 2, 3}	0,65	500	4925	0,00774
4	{1, 2, 3, 4}	0,65	500	6486	0,00679
5	{1, 2, 3, 4, 5}	0,85	500	7649	0,00633

Из-за ограничений размера статьи мы не приводим промежуточные результаты вычислений. Отметим только, что на каждом шаге в результате расчетов на экране ПК отображаются графики функций  $u_{\text{ТО}k}^+(T_k)$ ,  $c_{\text{уд}}^+(T_k)$  и  $T_0^+(T_k)$ . Интервал варьирования периодичности контроля  $T_k$  для формирования этих функций задается экспертом таким образом, чтобы минимум функции  $c_{\text{уд}}^+(T_k)$  оказался внутри интервала. На рис. 3 для примера приведены графики, полученные на последнем шаге процесса поиска решения.

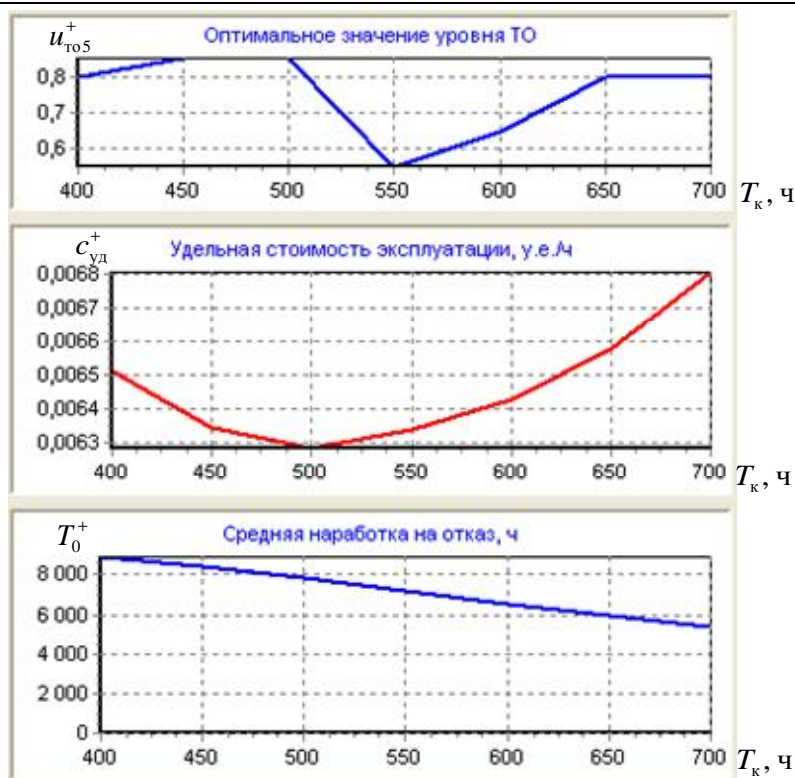


Рис. 3. Графики функций  $u_{ТОk}^+(T_k)$ ,  $c_{уд}^+(T_k)$  и  $T_0^+(T_k)$ , полученные после 5-го шага

Информация, представленная в табл. 1, является достаточной для принятия окончательного решения. Если, например, требуемое значение наработки на отказ для рассматриваемого объекта задать равным  $T_0^{TP} = 5000$  ч, то оптимальным будет решение, полученное на 4 шаге:

$$STO^* = \langle \{1, 2, 3, 4\}; \{0,5; 0,5; 0,65; 0,65\}; 500 \text{ ч} \rangle.$$

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

$$T_0(STO^*) = 6486 \text{ ч}; \quad c_{уд}(STO^*) = 0,00679 \text{ у.е./ч.}$$

**Вывод.** Рассмотренный пример позволяет сделать качественный вывод о правильности идей, положенных в основу методики, а также продемонстрировать работоспособность разработанного программного обеспечения.

### Литература

1. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Барзилович Е. Ю. – М. : Высш. школа, 1982. – 231 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.
3. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.
4. Банзак Г.В., Боряк К.Ф., Селюков А.В. Имитационная статистическая модель процесса технического обслуживания «по состоянию» сложного восстанавливаемого объекта РЭТ / Г. В. Банзак, К. Ф. Боряк, А. В. Селюков // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. – К., 2011. – № 31. – С. 4–12.

Надійшла 13.7.2011 р.