

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗИП СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РЭТ

Рассматривается трехуровневая система обеспечения ЗИП (запасное имущество и принадлежности) сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ), включающая одиночные ЗИП объектов (ЗИП-0), групповой ЗИП (ЗИП-1), и ЗИП центральной базы снабжения (ЗИП-2). ЗИП-0 предназначен для обеспечения текущего ремонта, ЗИП-1 используется в случае отсутствия запасных элементов в ЗИП-0, ЗИП-2 является источником для периодического пополнения ЗИП-0 и ЗИП-1. Вводятся параметры для формализованного описания системы обеспечения ЗИП. Строится математическая модель, устанавливающая связь показателей надежности и стоимости эксплуатации объектов РЭТ с параметрами системы обеспечения ЗИП. Модель реализована программно методом имитационного статистического моделирования.

Формулируется постановка задачи оптимизации параметров системы обеспечения ЗИП и анализируются возможности ее решения. Приводится пример моделирования системы обеспечения ЗИП.

Введение. Для обеспечения требуемого уровня надежности сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ) создается система обеспечения ЗИП (запасное имущество и принадлежности). Существуют различные подходы к построению такой системы, зависящие от назначения объектов РЭТ и условий их эксплуатации, от требований к уровню надежности объектов и многих других факторов. В данной статье рассматривается система обеспечения ЗИП, структура которой изображена на рис. 1. Сокращение ЗИП далее будем понимать в более узком, чем это обычно принято [1], смысле, просто как совокупность (множество) запасных частей (элементов), которые используются для восстановления работоспособности объекта при его отказе.

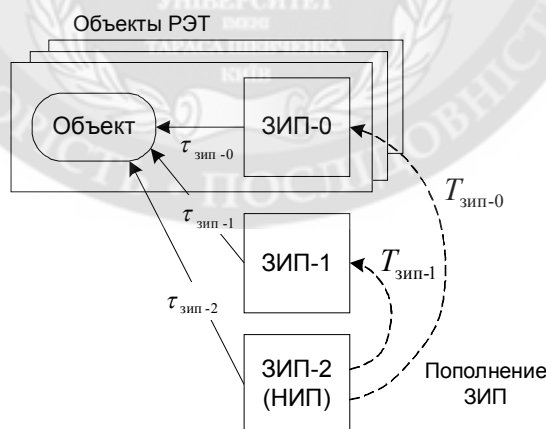


Рис. 1. Система обеспечения ЗИП

В рассматриваемой системе имеются три разновидности комплектов ЗИП: ЗИП-0 – комплект, придаваемый каждому объекту, расположенный непосредственно в месте его дислокации и перемещаемый с ним в случае, если объект РЭТ является подвижным или возимым. Комплект ЗИП-0 используется для текущего ремонта и содержит наименее надежные элементы, которые наиболее часто требуются для восстановления работоспособности объекта. ЗИП-0 часто называют одиночным ЗИП, так как он придается одному объекту. ЗИП-1 – комплект, придаваемый группе объектов (групповой ЗИП),

предназначен для хранения элементов, которые могут отсутствовать в ЗИП-0. ЗИП-1 обычно располагается в пункте (на складе), который находится примерно на равном удалении от объектов РЭТ. ЗИП-2 будем рассматривать как неисчерпаемый источник поставок (НИП), который используется как для периодического пополнения ЗИП-0 и ЗИП-1, так и как источник поставки элементов в тех случаях, когда нужный элемент в данное время отсутствует в ЗИП-0 и ЗИП-1.

Объекты РЭТ, для которых создается система обеспечения ЗИП, имеют иерархическую конструктивную структуру, которую можно представить в виде дерева, показанного на рис. 2. Отдельные конструктивные элементы могут быть как простыми (изображены кружками), так и составными (изображены прямоугольниками). Простые элементы в действительности

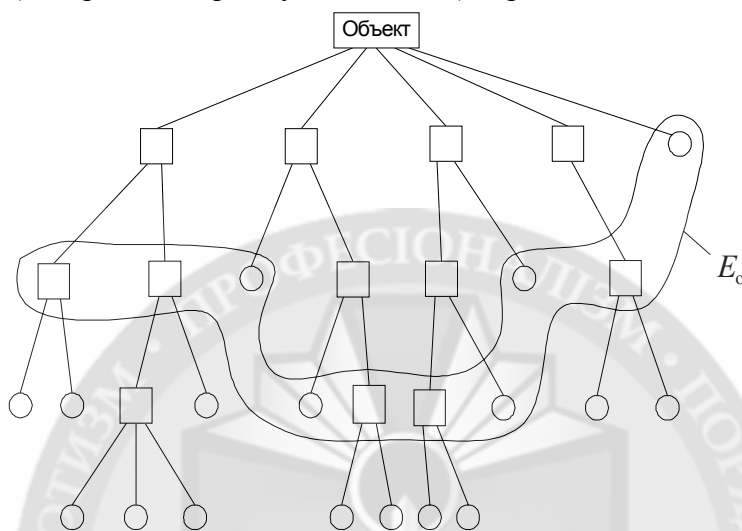


Рис. 2. Иерархическая конструктивная структура объекта РЭТ

могут быть сколь угодно сложными техническими изделиями, однако, в данной ситуации их внутреннее устройство не рассматривается. Составные элементы включают в себя как простые, так и составные элементы более низких конструктивных уровней.

Среди множества всех конструктивных элементов выделим его подмножество E_0 , которое условимся называть *множеством отказывающих элементов*. В множество E_0 включаются элементы, удовлетворяющие следующим двум условиям: 1) их работоспособное состояние обеспечивает работоспособное состояние объекта в целом (последовательное в смысле надежности соединение элементов), и 2) при отказах объекта для восстановления его работоспособности с наибольшей вероятностью осуществляется замена элементов, принадлежащих множеству E_0 . Очевидно, что в множество E_0 должны быть включены элементы, требующие наименьших трудозатрат при их замене.

Сложные объекты РЭТ обычно многофункциональны и при строгом подходе следовало бы множество E_0 определять для каждой функции отдельно. Мы примем допущение, что для объекта РЭТ можно выделить единственную (главную) функцию и для нее определяется множество E_0 .

Множеством E_0 определяется исходный перечень типонаименований элементов, которые должны включаться потенциально в те или иные комплекты ЗИП.

Формализация и постановка задачи оптимизации системы обеспечения ЗИП. Для формализованного описания отдельного комплекта ЗИП введем следующие параметры:

$\vec{X}_{\text{ЗИП } k} = \{x_i\}$ - вектор, определяющий состав k -го ЗИП, в котором x_i - количество элементов i -го типонаименования, имеющееся в составе данного ЗИП ($k = 0, 1$);

$T_{зип k}$ - периодичность пополнения k-го ЗИП; 1

$\tau_{зип k}$ - среднее время доставки элементов из k-го ЗИП ($k = 0, 1, 2$);

$C_{дзип k}$ - стоимость доставки элементов из k-го ЗИП.

С учетом этих обозначений рассматриваемую систему обеспечения ЗИП будем описывать следующим обобщенным параметром:

$$P_{зип} = \{\bar{X}_{зип k}, T_{зип k}, \tau_{дзип k}, C_{дзип k}; k = \overline{0, 2}\}. \quad (1)$$

Для представления характеристик объекта РЭТ введем обобщенный параметр следующего вида:

$$P_{рэт} = \{E_0, \{T_{сп i}, v_i, \tau_{пн i}, \tau_{зам i}, C_{0 i}, C_{зам i}; i = \overline{1, |E_0|}\}\}, \quad (2)$$

где E_0 - введенное выше множество отказывающих элементов; $T_{сп i}$ и v_i - показатели безотказности i-го элемента (средняя наработка до отказа и коэффициент вариации наработки до отказа); $\tau_{пн i}$ и $\tau_{зам i}$ - показатели ремонтпригодности i-го элемента (среднее время поиска неисправности и среднее время замены элемента); $C_{0 i}$ и $C_{зам i}$ - стоимость элемента и стоимость операции по его замене.

Качество процессов технической эксплуатации объектов РЭТ будем характеризовать следующими показателями:

T_0 - средняя наработка на отказ объекта;

$T_{п}$ - среднее время простоя в неработоспособном состоянии;

c_3 - удельная стоимость эксплуатации объекта.

От параметров $P_{зип}$ непосредственно зависят только показатели $T_{п}$ и c_3 , поэтому далее будут рассматриваться только эти показатели.

В общем виде задачу оптимизации параметров системы ЗИП с учетом введенных выше обозначений определим следующими условиями:

$$\begin{aligned} T_{п}(P_{рэт}, P_{зип}^*) &\leq T_{п}^{тp}; \\ c_3(P_{рэт}, P_{зип}^*) &= \min_{P_{зип}} c_3(P_{рэт}, P_{зип}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $T_{п}^{тp}$ - заданное требуемое значение допустимого времени простоя; $P_{рэт}$ - параметры объектов РЭТ, для которых предназначена система ЗИП; $P_{зип}$ - искомые оптимальные значения параметров системы обеспечения ЗИП.

Очевидно, что для решения задачи (3) необходимо знать зависимости целевых функций $T_{п}$ и c_3 от соответствующих конкретных параметров (1) и (2). Для определения этих зависимостей построим следующую математическую модель.

Математическая модель системы обеспечения ЗИП. Запишем систему математических выражений, связывающих показатели $T_{п}$ и c_3 с конкретными параметрами, представленными в (1) и (2).

Среднее время простоя $T_{п}$ можно представить двумя составляющими:

$$T_{п}(P_{рэт}, P_{зип}) = T_{в}(P_{рэт}) + T_{ож зип}(P_{рэт}, P_{зип}), \quad (4)$$

¹ Параметры $\bar{X}_{зип k}$ и $T_{зип k}$ для ЗИП-2 (НИП) смысла не имеют.

где $T_B(P_{рэт})$ - среднее время восстановления объектов; $T_{ож зип}(P_{рэт}, P_{зип})$ - среднее время ожидания доставки исправного элемента из ЗИП.

Величина T_B - это стандартная характеристика свойства ремонтпригодности объекта и от параметров $P_{зип}$ не зависит. С параметрами $P_{рэт}$ величина T_B связана следующим образом:

$$T_B(P_{рэт}) = \sum_{\forall i \in E_0} (\tau_{пн i} + \tau_{зам i}) \bar{\omega}_i / \sum_{\forall i \in E_0} \bar{\omega}_i, \quad (5)$$

где $\bar{\omega}_i$ - среднее значение параметра потока отказов i -го элемента. Величина $\bar{\omega}_i$ определяется выражением:

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_i(T_{сп i}, v_i) = \frac{1}{T_3} \int_0^{T_3} \omega_i(t/T_{сп i}, v_i) dt, \quad (6)$$

где T_3 - рассматриваемый интервал времени эксплуатации объекта; $\omega_i(t/T_{сп i}, v_i)$ - функция параметра потока отказов i -го элемента.

Суммирование в (5) ведется по всем отказывающим элементам E_0 .

Для величины $T_{ож зип}(P_{рэт}, P_{зип})$ запишем следующее выражение:

$$T_{ож зип}(P_{зип}) = K_{зип 0} \tau_{зип 0} + (1 - K_{зип 0}) [K_{зип 1} \tau_{зип 1} + (1 - K_{зип 1}) \tau_{зип 2}], \quad (7)$$

где $K_{зип k}$ - коэффициент готовности ЗИП – один из показателей достаточности ЗИП, который, имеет смысл вероятности того, что в произвольный момент времени в ЗИП найдется нужный для восстановления объекта запасной элемент [2]. Величина $K_{зип k}$ зависит от объема ЗИП $\bar{X}_{зип k}$, от периодичности его пополнения $T_{зип k}$ и от показателей безотказности элементов $\bar{\omega}_i$. Величину $K_{зип k}$ можно определить как усредненное значение вероятности достаточности ЗИП $P_{д зип k}(t/\bar{X}_{зип k}, \bar{\omega})$:

$$K_{зип k} = K_{зип k}(\bar{X}_{зип k}, T_{зип k}, \bar{\omega}) = \frac{1}{T_{зип k}} \int_0^{T_{зип k}} P_{д зип k}(t/\bar{X}_{зип k}, \bar{\omega}) dt, \quad (8)$$

где $P_{д зип k}(t/\bar{X}_{зип k}, \bar{\omega})$ - вероятность достаточности ЗИП $\bar{X}_{зип k}$ в момент времени t при условии, что при $t = 0$ ЗИП был пополнен до состава $\bar{X}_{зип k}$; $\bar{\omega}_i$ - вектор средних значений $\bar{\omega}_i: \bar{\omega} = \{\bar{\omega}_i; i = 1, |E_0|\}$.

Удельную стоимость эксплуатации объекта c_3 представим такими двумя составляющими:

$$c_3(P_{рэт}, P_{зип}) = c_{тр}(P_{рэт}) + c_{зип}(P_{рэт}, P_{зип}), \quad (9)$$

где $c_{тр}(P_{рэт})$ - затраты на текущие ремонты объекта; $c_{зип}(P_{рэт}, P_{зип})$ - затраты на систему обеспечения ЗИП.

Величину $c_{тр}(P_{рэт})$ можно рассчитать следующим образом:

$$c_{тр}(P_{рэт}) = \left(\sum_{\forall i \in E_0} (C_{0i} + C_{зам i}) \bar{n}_{отк i} \right) / T_3, \quad (10)$$

где $\bar{n}_{отк i}$ - среднее число отказов i -го элемента на рассматриваемом периоде эксплуатации T_3 . Величина $\bar{n}_{отк i}$ определяется как произведение $\bar{\omega}_i \cdot T_3$.

Затраты на систему обеспечения ЗИП $c_{\text{зип}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}})$ определяются суммой:

$$c_{\text{зип}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}}) = c_{\text{зип д}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}}) + c_{\text{зип п}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}}), \quad (11)$$

где $c_{\text{зип д}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}})$ - затраты стоимости на доставку запасных элементов из ЗИП; $c_{\text{зип п}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}})$ - затраты на пополнение комплектов ЗИП.

Составляющую затрат $c_{\text{зип д}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}})$ найдем из выражения:

$$c_{\text{зип д}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}}) = \bar{n}_{\text{отк } \Sigma} \left[K_{\text{зип 0}} C_{\text{д зип 0}} + (1 - K_{\text{зип 0}}) (K_{\text{зип 1}} C_{\text{д зип 1}} + (1 - K_{\text{зип 1}}) C_{\text{д зип 2}}) \right] / T_{\text{э}}, \quad (12)$$

где $\bar{n}_{\text{отк } \Sigma}$ - среднее суммарное количество отказов объекта за время $T_{\text{э}}$ ($\bar{n}_{\text{отк } \Sigma} = T_{\text{э}} \sum_{i \in E_0} \bar{\omega}_i$); $K_{\text{зип } k}$ - введенные выше коэффициенты готовности ЗИП; $C_{\text{д зип } k}$ - стоимость одной доставки из ЗИП k -го уровня ($k = 0, 1, 2$).

Составляющую затрат $c_{\text{зип п}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}})$, связанных с периодическим пополнением ЗИП, определим выражением:

$$c_{\text{зип п}}(P_{\text{рэт}}, P_{\text{зип}}) = \frac{1}{T_{\text{э}}} \sum_{k=0}^{k=1} n_{\text{п зип } k} \left[C(\bar{X}_{\text{зип } k}) - C(\bar{X}_{\text{зип } k}^-, T_{\text{зип } k}) + C_{\text{нр}} \right], \quad (13)$$

где $n_{\text{п зип } k}$ - число поставок (пополнений) ЗИП k -го вида за время $T_{\text{э}}$; $C_{\text{зип}}(\bar{X}_{\text{зип } k})$ - стоимость комплекта ЗИП k -го вида; $C(\bar{X}_{\text{зип } k}^-, T_{\text{зип } k})$ - средняя стоимость остатка ЗИП k -го вида в момент его очередного пополнения; $C_{\text{нр}}$ - стоимость накладных расходов (комплектование, упаковка и т.п.).

Величина $n_{\text{п зип } k}$ равна $n_{\text{п зип } k} = \left\lfloor T_{\text{э}} / T_{\text{зип } k} \right\rfloor$, где квадратные скобки обозначают операцию взятия целой части. Величина $C_{\text{зип}}(\bar{X}_{\text{зип } k})$ определяется просто как сумма стоимостей элементов, входящих в состав ЗИП:

$$C(\bar{X}_{\text{зип } k}) = \sum_{\forall i \in E_0} x_i C_{0i}. \quad (14)$$

Величина $C(\bar{X}_{\text{зип } k}^-, T_{\text{зип } k})$ определяется следующим образом:

$$C(\bar{X}_{\text{зип } k}^-, T_{\text{зип } k}) = \sum_{\forall i \in E_0} [x_i - a_i(T_{\text{зип } k})] C_{0i}, \quad (15)$$

где $a_i(T_{\text{зип } k})$ - средний расход элементов i -го типономинала на интервале пополнения $T_{\text{зип } k}$. Величину $a_i(T_{\text{зип } k})$ можно найти через параметр потока отказов элементов i -го типономинала $\bar{\omega}_i$ как произведение $\bar{\omega}_i \cdot T_{\text{зип } k}$.

Приведенные выше выражения, устанавливающие зависимость показателей $T_{\text{п}}$ и $c_{\text{э}}$ от конкретных параметров (1)-(2) представляют собой математическую модель рассматриваемой системы обеспечения ЗИП. Практическая реализация этой модели, с помощью которой можно было бы производить конкретные расчеты, связана со значительными трудностями. Поэтому данная модель была реализована методом имитационного статистического моделирования в рамках ранее разработанной программы ISMPN [2]. В эту же программу были внесены дополнения, позволяющие решать оптимизационную задачу (3), суть этих дополнений кратко рассматривается ниже.

Методика решения задачи оптимизации системы обеспечения ЗИП. Будем полагать, что среди множества параметров, относящихся к $P_{\text{зип}}$, оптимизации подлежат

состав ЗИП $\vec{X}_{\text{зип } k}$ и периодичность его пополнения $T_{\text{зип } k}$. С учетом этого общую постановку задачи (3) оптимизации параметров системы обеспечения ЗИП в компактном виде запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{\Pi} \left(\left\langle \vec{X}_{\text{зип } k}^*, T_{\text{зип } k}^* \right\rangle; k = \overline{0,1} \right) &\leq T_{\Pi}^{\text{TP}}; \\ c_{\varepsilon} \left(\left\langle \vec{X}_{\text{зип } k}^*, T_{\text{зип } k}^* \right\rangle; k = \overline{0,1} \right) &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (16)$$

Звездочкой * здесь, как и ранее, отмечены искомые оптимизируемые параметры. Остальные параметры в записи (16) опущены, они в данной задаче являются неуправляемыми параметрами и рассматриваются просто как исходные данные.

Трудности решения данной задачи обусловлены рядом обстоятельств, главными из которых являются следующие:

- 1) Основные искомые параметры $\vec{X}_{\text{зип } k}^*$ являются векторами, что требует поиска специальных приемов для определения оптимальных значений их отдельных составляющих;
- 2) Существенная взаимозависимость между оптимизируемыми параметрами: с одной стороны, очевидно, что состав ЗИП $\vec{X}_{\text{зип } k}^*$ зависит от периодичности его пополнения $T_{\text{зип } k}^*$, и, с другой стороны, оптимальные пары параметров $\left\langle \vec{X}_{\text{зип } k}^*, T_{\text{зип } k}^* \right\rangle$ также взаимозависимы;
- 3) Для целевых функций задачи T_{Π} и c_{ε} неизвестны их аналитические зависимости от параметров, их значения (оценки) определяются путем статистического моделирования, и поэтому известны только в заданных точках пространства параметров.

Для преодоления первой из указанных трудностей можно воспользоваться таким приемом. Известно достаточно большое количество идейно сходных методик определения оптимального состава ЗИП при заданном значении показателя его достаточности [3,4]. Если задано требуемое значение вероятности достаточности ЗИП $P_{\text{зип}}^{\text{TP}}$, то задача определения оптимального комплекта ЗИП при заданной периодичности его пополнения $T_{\text{зип}}$ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} P_{\text{зип}} \left(\vec{X}_{\text{зип}}^+, T_{\text{зип}} \right) &\geq P_{\text{зип}}^{\text{TP}}; \\ n_{\text{зип}} \left(\vec{X}_{\text{зип}}^+ \right) &\rightarrow \min_{\vec{X}_{\text{зип}}^+}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\vec{X}_{\text{зип}}^+$ - искомый оптимальный состав ЗИП; $n_{\text{зип}} \left(\vec{X}_{\text{зип}}^+ \right)$ - суммарное количество элементов в ЗИП состава $\vec{X}_{\text{зип}}^+$: $n \left(\vec{X}_{\text{зип}}^+ \right) = \sum_{x_i \in \vec{X}_{\text{зип}}^+} x_i$. Методика решения задачи (17) для

случая, если наработка между отказами элементов подчинена DN -распределению, подробно изложена в [5], поэтому здесь мы ее не рассматриваем. Эта методика использована в программе ISMPN.

Нетрудно видеть, что решением задачи (17) параметры $\vec{X}_{\text{зип}}^+$ и $T_{\text{зип}}$ связываются между собой: каждой паре значений $\left\langle \vec{X}_{\text{зип}}^+, T_{\text{зип}} \right\rangle$ ставится в соответствие единственное значение вероятности достаточности $P_{\text{зип}}^{\text{TP}}$, и наоборот, при заданных фиксированных значениях $T_{\text{зип}}$ и $P_{\text{зип}}^{\text{TP}}$ мы получаем единственный соответствующий им оптимальный вектор $\vec{X}_{\text{зип}}^+$. Благодаря этому мы получаем возможность «уйти» в задаче (16) от

необходимости прямого поиска оптимальных векторов $\bar{X}_{зип k}^*$. Вместо задачи (16) мы с равным успехом можем решать задачу

$$T_{п} \left(\left\langle P_{зип k}^*, T_{зип k}^* \right\rangle; k = \overline{0,1} \right) \leq T_{п}^{тр}; \quad (18a)$$

$$c_{э} \left(\left\langle P_{зип k}^*, T_{зип k}^* \right\rangle; k = \overline{0,1} \right) \rightarrow \min, \quad (18б)$$

в которой все оптимизируемые параметры являются скалярами.

Однако и в этом виде задача по-прежнему остается достаточно сложной из-за существенной взаимозависимости между парами оптимизируемых параметров $\langle P_{зип k}^*, T_{зип k}^* \rangle$.

В программе ISMPN [2], с помощью которой осуществляется прогнозирование показателей надежности и стоимости эксплуатации объекта РЭТ, добавлен режим, в котором решается задача (17) определения оптимального состава ЗИП $\bar{X}_{зип}^+$ по заданному значению $P_{зип}^{тр}$. Полученный вектор $\bar{X}_{зип}^+$ сохраняется в памяти компьютера. Затем производится моделирование, в результате которого получают оценки показателей $T_{п}$ и $c_{э}$ с учетом ЗИП, то есть, фактически получают целевые функции задачи (18). Идея методика приближенного решения задачи с использованием программы ISMPN кратко состоит в следующем.

Вначале задается (из соображений здравого смысла) исходный вариант решения задачи

$$z_0 = \left\langle P_{зип 0}^+, T_{зип 0}^+ \right\rangle, \left\langle P_{зип 1}^+, T_{зип 1}^+ \right\rangle.$$

Затем рассчитываются соответствующие этому решению оптимальные значения векторов $\bar{X}_{зип 0}^+$ и $\bar{X}_{зип 1}^+$, которые сохраняются в памяти. После этого производится моделирование в режиме «с учетом ЗИП», в результате чего получают оценки целевых функций $T_{п}(z_0)$ и $c_{э}(z_0)$. Если их значения соответствуют условиям (18), задача считается решенной в первом приближении. В противном случае выполняются повторные расчеты, направленные на поиск улучшенного варианта решения. Более подробно данную методику рассмотрим на конкретном примере.

Пример моделирования. Для примера возьмем объект, в котором определены 12 отказывающих элементов ($|E_0|=12$) с параметрами $T_{ср i}$ и $C_{0 i}$, указанными в табл. 1. Остальные параметры зададим одинаковыми для всех элементов: $\tau_{пн i} = \tau_{зам i} = 0,5$ ч; $C_{зам i} = 1$ у.е.; $v_i = 0,8$.

Параметры системы обеспечения ЗИП зададим следующие: $T_{зип 0} = 1$ год; $T_{зип 1} = 5$ лет; $\tau_{д зип 0} = 0,5$ ч; $\tau_{д зип 1} = 6$ ч; $\tau_{д зип 2} = 24$ ч; $C_{д зип 0} = 1$ у.е.; $C_{д зип 1} = 10$ у.е.; $C_{д зип 0} = 100$ у.е.

Продолжительность эксплуатации объекта зададим $T_э = 20$ лет.

Вначале произведем расчеты в режиме «без учета ЗИП» (в этом режиме ЗИП-0 считается неограниченным и время доставки для него равно 0). В результате расчетов в этом режиме получают такие оценки показателей: $T_0 = 1353$ ч; $T_{п} = 1$ ч; $c_э = 0,01639$ у.е./ч.

В качестве исходных значений вероятности достаточности зададим $P_{зип 0}^{тр} = P_{зип 1}^{тр} = 0,9$. Этим самым мы задали следующий вариант исходного решения: $z_0 = \langle 0,9; 1 \rangle, \langle 0,9; 5 \rangle$; Для этого варианта решения сформируем соответствующие им локально оптимальные комплекты ЗИП-0 и ЗИП-1. Это делается следующим образом.

С помощью программы ISMPN в режиме **База данных|ЗИП** вначале сформируем состав ЗИП-0 (вектор $\bar{X}_{\text{зип}0}^+$), затем сформируем ЗИП-1 (вектор $\bar{X}_{\text{зип}1}^+$). Для формирования ЗИП-1 зададим количество обеспечиваемых объектов $N_{\text{об}} = 10$. Полученные при этом вектора $\bar{X}_{\text{зип}0}^+$ и $\bar{X}_{\text{зип}1}^+$ сохраняются в памяти компьютера.

После этого произведем моделирование в режиме «с учетом ЗИП». Для исходного варианта решения z_0 получаются следующие значения целевых функций:

$$T_{\Pi}(z_0) = 6,45 \text{ ч}; c_3(z_0) = 0,04702 \text{ у.е./ч.}$$

Средняя наработка на отказ объекта при этом осталась практически неизменной: $T_0 = 1353 \text{ ч.}$

В табл. 1 для иллюстрации приведены также составы ЗИП-0, полученные при различных значениях вероятности достаточности $P_{\text{зип}0}^{\text{ТР}}$ (при $P_{\text{зип}1}^{\text{ТР}} = 0,9$).

Таблица 1

Показатели надежности и стоимости отказывающихся элементов и состав ЗИП-0 при различных значениях вероятности достаточности $P_{\text{дзип}}^{\text{ТР}}$ (при $T_{\text{зип}} = 1 \text{ год}$)

Показатели надежности и стоимости элементов			Состав ЗИП-0 при различных значениях вероятности достаточности $P_{\text{дзип}}^{\text{ТР}}$ (вектор $\bar{X}_{\text{зип}0}^+$)					
Элемент	$T_{\text{ср}i}, \text{ ч}$	$C_{0i}, \text{ у.е.}$	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999	0,9995
1	7179	30	2	3	4	5	6	7
2	8630	40	2	2	3	4	5	6
3	10000	10	1	2	3	3	4	5
4	10101	20	1	2	3	3	4	5
5	11180	20	1	1	2	3	4	4
6	14285	10	1	1	2	2	3	3
7	14285	10	1	1	2	2	3	3
8	25000	10	0	0	1	1	1	1
9	98058	20	0	0	0	0	0	0
10	100000	10	0	0	0	0	0	0
11	200000	10	0	0	0	0	0	0
12	500000	10	0	0	0	0	0	0

Аналогичные расчеты произведем при различных значениях $P_{\text{зип}0}^{\text{ТР}}$ и $T_{\text{зип}0}$: $P_{\text{зип}0}^{\text{ТР}} = \{0,9; 0,95; 0,99; 0,995; 0,999; 0,9995\}$, $T_{\text{зип}0} = \{1, 2, 3 \text{ года}\}$. Вероятность $P_{\text{зип}1}^{\text{ТР}}$ при этом остается фиксированной $P_{\text{зип}1}^{\text{ТР}}(0,9)$. Полученные результаты сведены в табл. 2.

Показатели эксплуатации объектов РЭТ, зависящие от параметров системы ЗИП

Параметры системы ЗИП				Показатели эксплуатации объектов РЭТ	
$T_{зип}$	$P_{дзип}^{тр}$	$n_{зип0}$	$n_{зип1}$	$T_{п}, ч$	$c_3, у.е./ч$
1 год	0,9	9	117	5,71	0,04467
	0,95	13	76	4,11	0,04051
	0,99	20	13	1,78	0,03447
	0,995	23	11	1,74	0,03439
	0,999	30	11	1,72	0,03433
	0,9995	34	10	1,72	0,03433
2 года	0,9	22	23	2,41	0,03548
	0,95	29	15	1,82	0,03395
	0,99	44	9	1,72	0,03381
	0,995	51	9	1,71	0,03375
	0,999	72	11	1,71	0,03373
	0,9995	78	10	1,71	0,03374
3 года	0,9	35	12	2,08	0,03300
	0,95	44	9	1,86	0,03241
	0,99	72	11	1,80	0,03228
	0,995	81	10	1,80	0,03224
	0,999	109	10	1,80	0,03224
	0,9995	123	9	1,80	0,03229

Если, например, принять, что $T_{п}^{тр} = 2$ ч, тогда по данным табл. 2 можно определить, что условию (18а) удовлетворяют три варианта решения:

$$z_1 = \{ \langle 0,99; 1 \rangle, \langle 0,9; 5 \rangle \}; \quad T_{п}(z_1) = 1,78 \text{ ч}; \quad c_3(z_1) = 0,03447 \text{ у.е./ч.};$$

$$z_2 = \{ \langle 0,95; 2 \rangle, \langle 0,9; 5 \rangle \}; \quad T_{п}(z_2) = 1,82 \text{ ч}; \quad c_3(z_2) = 0,03395 \text{ у.е./ч.};$$

$$z_3 = \{ \langle 0,95; 3 \rangle, \langle 0,9; 5 \rangle \}; \quad T_{п}(z_3) = 1,86 \text{ ч}; \quad c_3(z_3) = 0,03241 \text{ у.е./ч.}$$

По критерию (18б) формально по этим данным наилучшим является вариант z_3 . Однако, он может оказаться неприемлемым, например, из-за слишком большого количества элементов в ЗИП-0 ($n_{зип0} = 44$). Поэтому пользователю в данном примере, возможно, придется поискать другие компромиссные решения. Разработанное программное обеспечение предоставляет для этого все возможности.

Выводы. В статье предложена математическая модель системы обеспечения ЗИП сложных объектов РЭТ и методика ее оптимизации. Математическая модель реализована программно методом имитационного статистического моделирования в рамках ранее разработанной программы ISMPN [2]. Ввиду сложности задачи возможно только приближенное, пошаговое ее решение. Разработанное программное обеспечение предоставляет возможность пользователю в интерактивном режиме исследовать задачу и находить близкие к оптимальным приемлемые решения.

ЛИТЕРАТУРА:

- ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. с 01.01.1980.
- Прогнозирование надежности сложных объектов радиоэлектронной техники и оптимизация параметров их технической эксплуатации с использованием имитационных статистических моделей.

Монографія / С.В. Ленков, К.Ф. Боряк, Г.В.Банзак, В.О. Браун [и др.] : под ред. С.В.Ленкова. – Одесса : Изд-во «ВМВ», 2014. – 256 с.

3. Головин И. Н., Чуварыгин Б. В., Шура-Бура А. Э. Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.

4. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин и др.; Под ред. проф. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

5. Стрельников В.П. Расчет запасных частей на основе DN-распределения// Математические машины и системы, - К.: 2009. №3. С. 188 – 193.

Без рецензії.

**к.військ.н., доц. Пашков С.О., к.т.н., доц. Осипа В.О.,
д.т.н., проф. Ленков С.В., к.т.н. Шкулипа П.А., Березовська Ю.В.
МОДЕЛЮВАННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗМП СКЛАДНИХ
ОБ'ЄКТІВ РЕТ**

Розглядається трирівнева система забезпечення ЗМП складних об'єктів радіоелектронної техніки (РЕТ), що включає одиночні ЗМП об'єктів (ЗМП -0), груповий ЗМП (ЗМП -1), і ЗМП центральної бази постачання (ЗМП -2). ЗМП -0 призначений для забезпечення поточного ремонту, ЗМП -1 використовується у випадку відсутності запасних елементів у ЗМП -0, ЗМП-2 є джерелом для періодичного поповнення ЗМП-0 і ЗМП-1. Вводяться параметри для формалізованого опису системи забезпечення ЗМП. Будується математична модель, що встановлює зв'язок показників надійності й вартості експлуатації об'єктів РЕТ з параметрами системи забезпечення ЗМП. Модель реалізована програмно методом імітаційного статистичного моделювання.

Формулюється постановка задачі оптимізації параметрів системи забезпечення ЗМП і аналізуються можливості її розв'язання. Наводиться приклад моделювання системи забезпечення ЗМП.

**Ph.D. Pashkov S.A., Ph.D. Ossypa V.O., Prof. Lenkov S.V., Shkulipa P.A., Berezovska J.V.
SIMULATION AND OPTIMIZATION SOFTWARE (SPARE PROPERTY AND
ACCESSORIES) SPA OF A COMPLEX OBJECT RET**

We consider the three-level system software (spare property and accessories) SPA of complex objects of radio-electronic technology (RET), including single objects SPA (SPA -0), Group SPA (SPA -1) and the central spare parts supply base (SPA -2). SPA -0 is designed to provide maintenance, spare parts-1 is used in the absence of replacement items in 0- SPA, SPA -2 is the source for periodic replenishment of spare parts, spare parts 0 and 1.

Entering parameters for the formal description of the system to ensure spare parts.

Mathematical model that establishes a connection reliability and cost of operation of RET with the parameters of the system to ensure spare parts.

The model is implemented by software simulation of statistical modeling.

Formulation of the problem is formulated to optimize system parameters ensure that spare parts are analyzed and possible solutions. An example of simulation system for spare parts.