

УДК 519.873

А. Н. Буточнов<sup>1</sup>, В. Б. Осташевский<sup>1</sup>, В. Н. Цыцарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет им. Т.Г. Шевченко

## Методика расчета ЗИП комплекса технических средств автоматизированной системы обработки информации о подвижных объектах

*Для расчета ЗИП (запасных изделий и принадлежностей) предложена приближенная методика, в основу которой положен подход к расчету показателей надежности с использованием показателей достаточности ЗИП. Показатели надежности с учетом ЗИП в этом случае, представлены в виде произведения показателя надежности, рассчитанного для неограниченного ЗИП, и соответствующего показателя достаточности ЗИП.*

**Ключевые слова:** методика расчета ЗИП, показатели надежности, показатели достаточности, стратегии пополнения ЗИП, структурная схема надежности.

### Постановка задачи

Комплекс технических средств (КТС) автоматизированной системы обработки информации о подвижных объектах представляет собой сложную техническую систему, длительная эксплуатация которой невозможна без использования запасных изделий и принадлежностей (ЗИП), необходимых при проведении ремонтов и технического обслуживания.

К числу основных особенностей КТС, существенных с точки зрения определения требуемого состава ЗИП, относятся:

— ремонт (восстановление работоспособности) КТС производится силами обслуживающего персонала путем замены только таких элементов, для которых она предусмотрена (разрешается) поставщиком оборудования;

— ремонт отказавших сменных элементов в пункте дислокации КТС не производится. Неисправные элементы для ремонта должны отправляться в ремонтный орган.

Из этого следует, что для обеспечения требуемого уровня надежности КТС в процессе эксплуатации необходимо иметь комплект ЗИП, состав которого обеспечит бы заданные требования к надежности.

© А. Н. Буточнов, В. Б. Осташевский, В. Н. Цыцарев

Очевидно, что по экономическим соображениям ЗИП не может быть неограниченным, и существует задача определения оптимального состава ЗИП. Под оптимальным будем понимать такой комплект ЗИП, при котором обеспечиваются требуемые значения показателей надежности КТС, и при этом стоимость ЗИП минимальна.

Предполагается, что для КТС принята одноуровневая схема обеспечения ЗИП, при которой предусматривается только одиночный ЗИП (ЗИП-О), располагаемый в пункте дислокации. Если нужный для ремонта запасной элемент (ЗЭ) в ЗИП отсутствует, то он доставляется из центральной базы (ЦБ) технического обеспечения. Схема обеспечения КТС ЗИП в этом случае имеет вид, представленный на рис. 1.

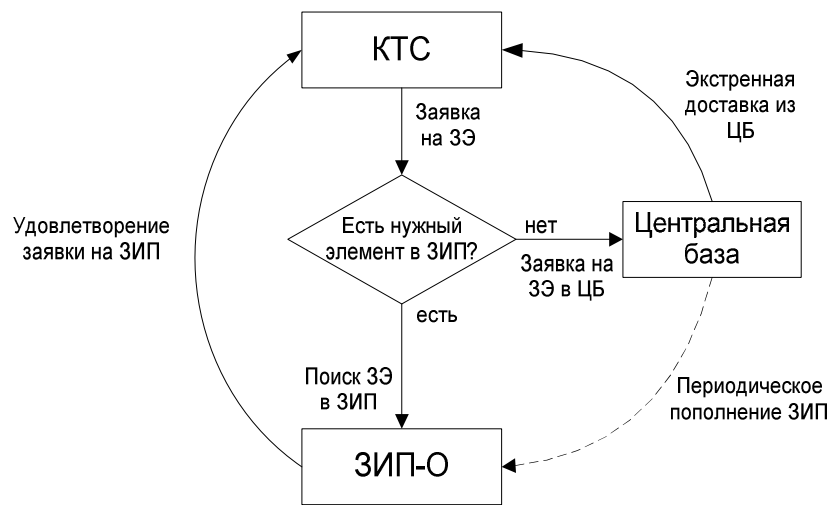


Рис. 1. Схема обеспечения КТС ЗИП

Комплект ЗИП обычно рассчитывается на определенный период эксплуатации, так как в процессе эксплуатации ЗИП расходуется, и его необходимо пополнять. Возможны различные способы (стратегии) пополнения ЗИП:

— *периодическое пополнение.* Пополнение комплекта ЗИП до требуемого состава производится периодически с заданным периодом  $T_{\text{ЗИП}}$ . В случае, если необходимый для ремонта элемент в ЗИП отсутствует (происходит «отказ ЗИП»), система остается в этом состоянии до очередного пополнения ЗИП. Очевидно, что такая стратегия соответствует наиболее жестким требованиям к составу ЗИП;

— *экстренное пополнение.* В этом случае так же назначается период пополнения ЗИП  $T_{\text{ЗИП}}$ . Отличие заключается в том, что в случае «отказа ЗИП» производится экстренное пополнение (ЭП) комплекта ЗИП. Время запаздывания при экстренном пополнении ЗИП  $T_{\text{ЭП}} \ll T_{\text{ЗИП}}$ .

— *непрерывное пополнение.* При непрерывном пополнении ЗИП пополняется сразу после каждого отказа элемента КТС. Время доставки при каждом пополнении равно  $T_{\text{ДЦБ}}$ .

Очевидно, что наиболее гибкой является стратегия экстренного пополнения ЗИП. Стратегии периодического и непрерывного пополнения, по сути, являются предельными случаями стратегии экстренного пополнения.

Вопросам расчета ЗИП посвящено достаточно большое количество работ. Однако, точные расчеты, как правило, оказываются весьма громоздкими и не всегда приемлемыми в инженерной практике. Особые трудности возникают в случае, когда система, для которой создается ЗИП, имеет высокую степень внутреннего структурного резервирования.

## Методика расчета ЗИП

В основу методики положен подход к расчету показателей надежности КТС, рассмотренный в [1]. Учет влияния ЗИП на величину показателей надежности (ПН) производится с использованием показателей достаточности (ПД) ЗИП [3].

Определение оптимального состава ЗИП производится с помощью пошаговой процедуры, в которой на каждом шаге в ЗИП добавляется элемент, выбираемый по критерию «надежность/стоимость». Процедура формирования ЗИП завершается при достижении величинами показателей надежности требуемого значения.

Общая идея применения показателей достаточности ЗИП основана на том, что результирующее выражение для показателей надежности КТС с учетом ЗИП представляется в виде произведения показателя надежности, рассчитанного при неограниченном ЗИП, и соответствующего показателя достаточности ЗИП. Это справедливо только для таких показателей надежности как вероятность безотказной работы и коэффициент готовности.

Выражения для показателей надежности имеют следующий вид:

$$P_{\text{КТС}}(t/X) = P_{\text{КТС}}(t/\infty) P_{\text{ЗИП}}(t/X), \quad (1)$$

$$K_{\Gamma\text{КТС}}(X) = K_{\Gamma\text{КТС}}(\infty) K_{\Gamma\text{ЗИП}}(X), \quad (2)$$

где  $P_{\text{КТС}}(t/X)$  и  $K_{\Gamma\text{КТС}}(X)$  — вероятность безотказной работы и коэффициент готовности КТС с учетом ЗИП, заданного вектором  $X$ ;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  — вектор, определяющий состав комплекта ЗИП, где  $x_i$  — число запасных элементов  $i$ -го типа в комплекте ЗИП ( $i = \overline{1, n}$ , где  $n$  — число различных типов элементов КТС);

$P_{\text{КТС}}(t/\infty)$  и  $K_{\Gamma\text{КТС}}(\infty)$  — вероятность безотказной работы и коэффициент готовности КТС при условии, что ЗИП неограниченный ( $X = \{\infty, \infty, \dots, \infty\}$ );

$P_{\text{ЗИП}}(t/X)$  — вероятность достаточности ЗИП, определяемая как вероятность того, что в любой момент времени интервала  $(0, t)$  всегда найдется запасной элемент, требуемый для замены отказавшего элемента КТС;

$K_{ГЗИП}(X)$  — коэффициент готовности ЗИП, равный вероятности того, что требуемый запасной элемент всегда найдется в комплекте ЗИП в произвольный момент времени рассматриваемого периода эксплуатации КТС.

Величины  $P_{ЗИП}(t/X)$  и  $K_{ГЗИП}(X)$  — это показатели достаточности ЗИП, значения которых зависят как от состава комплекта ЗИП, так и от принятой стратегии его пополнения.

Достоинством подхода, основанного на использовании показателей достаточности, является то, что эти показатели можно нормировать и, следовательно, рассчитывать состав ЗИП независимо от значений показателей надежности. Определение значений показателей достаточности можно производить следующим образом:

$$P_{ЗИП}^0(t) = P_{КТС}^0(t) / P_{КТС}(t/\infty), \quad (3)$$

$$K_{ГЗИП}^0 = K_{ГКТС}^0 / K_{ГКТС}(\infty), \quad (4)$$

где  $P_{КТС}^0(t)$  и  $K_{ГКТС}^0$  — заданные нормативные значения для вероятности безотказной работы и коэффициента готовности КТС.

Однако существуют ограничения применения показателей достаточности, заключающиеся в том, что для систем со структурным резервированием не существует универсальных формул для их определения, пригодных для любых схем структурного резервирования. Тем не менее, подход с использованием показателей достаточности ЗИП можно применять для расчетов показателей надежности на уровне отдельных типов элементов КТС.

Для расчета показателей надежности КТС с учетом ЗИП предлагается методика, содержание которой предполагает выполнение следующих этапов.

1. Анализ надежностной структуры КТС и определение подмножества типов элементов, которые (потенциально) могут входить в комплект ЗИП. При этом определяется группа однотипных элементов, надежностная схема их соединения, схема соединения отдельных групп в надежностную структуру КТС в целом.

Надежностная структура КТС представляется структурной схемой надежности (ССН), которая на верхнем уровне детализации представляет собой последовательное соединение элементов, каждый из которых может представляться «своей» ССН. Надежностная структура каждого элемента последовательно детализируется до того уровня, на котором отдельными элементами являются сменные элементы (блоки, узлы, детали и т.п.), для которых предусматривается замена в процессе эксплуатации. Таким образом, на нижнем уровне надежностной структуры КТС выделяются группы однотипных элементов, которые могут включаться в комплект ЗИП. Эти группы элементов (ГЭ) могут являться как структурно резервированными (РГЭ), так и представляться единственным элементом.

Структура каждой РГЭ рассматривается как нагруженный или ненагруженный «скользящий резерв» с произвольно задаваемым числом основных и резервных элементов в группе.

2. Расчет значений вероятности безотказной работы и коэффициента готовности для отдельных групп элементов и КТС в целом по формулам для восстанавливаемых резервированных систем в предположении, что ЗИП неограниченный.

В результате расчетов должны быть получены:

$P_i(t/s_i, \infty)$  — вероятность безотказной работы  $i$ -й группы элементов при неограниченном ЗИП;

$K_{Гi}(s_i, \infty)$  — коэффициент готовности  $i$ -й группы элементов при неограниченном ЗИП.

Параметр  $s_i$  определяет вид структурного резерва  $i$ -й группы элементов и может принимать значения:

$s_i = 1$  — группа состоит из единственного элемента (вырожденная группа элементов);

$s_i = 2$  — последовательное соединение элементов в группе;

$s_i = 3$  — параллельное соединение элементов в группе;

$s_i = 4$  — «скользящий» нагруженный резерв;

$s_i = 5$  — «скользящий» ненагруженный резерв.

Расчетные формулы для определения  $P_i(t/s_i, \infty)$  и  $K_{Гi}(s_i, \infty)$  приведены в [2].

В качестве среднего времени восстановления групп элементов нижних уровней принимается величина

$$T_{Ви}(\infty) = T_{Pi} + T_{ДЗИП}, \quad (5)$$

где  $T_{Pi}$  — средняя продолжительность ремонта (замены) элемента  $i$ -го типа (элемента  $i$ -й группы элементов);

$T_{ДЗИП}$  — среднее время доставки элемента из ЗИП (которое от типа элементов не зависит).

3. Расчет значений показателей достаточности ЗИП для всех групп элементов нижнего уровня:

$P_{ЗИПi}(t/\alpha, x_i)$  — вероятность достаточности ЗИП для элементов  $i$ -го типа;

$K_{ГЗИПi}(\alpha, x_i)$  — коэффициент готовности ЗИП для элементов  $i$ -го типа,

где

$\alpha$  — параметр, определяющий способ (стратегию) пополнения ЗИП;

$x_i$  — число элементов  $i$ -го типа, имеющееся в комплекте ЗИП ( $x_i \in X$ ).

Параметр  $\alpha$  может принимать значения:

$\alpha_i = 1$  — периодическое пополнение;

$\alpha_i = 2$  — пополнение с экстренными доставками;

$\alpha_i = 3$  — непрерывное пополнение.

Расчетные формулы для показателей достаточности  $P_{\text{ЗИП}_i}(t/\alpha, x_i)$  и  $K_{\Gamma \text{ЗИП}_i}(\alpha, x_i)$  приведены ниже.

4. По полученным значениям показателей достаточности ЗИП рассчитывается среднее время ожидания доставки запасных элементов из центральной базы при различных стратегиях пополнения ЗИП. Это время обозначается  $\Delta t_{\text{ЗИП}_i}(\alpha, x_i)$  и рассчитывается следующим образом:

$$\Delta t_{\text{ЗИП}_i}(\alpha, x_i) = -\ln(K_{\Gamma \text{ЗИП}_i}(\alpha, x_i))/(k_i \lambda_i), \quad (6)$$

где  $k_i$  — число элементов  $i$ -й группы элементов, находящихся в нагруженном состоянии;

$\lambda_i$  — интенсивность отказов элементов  $i$ -го типа (элементов  $i$ -й группе элементов).

Определяется величина среднего времени восстановления  $i$ -й группы элементов нижнего уровня как сумма

$$T_{\text{В}_i}(\alpha, x_i) \cong T_{\text{Р}_i} + T_{\text{Д ЗИП}} + \Delta t_{\text{ЗИП}_i}(\alpha, x_i). \quad (7)$$

Рассчитываются показатели надежности для  $i$ -й группы элементов с учетом ЗИП по формулам для восстанавливаемых систем, в которых в качестве среднего времени восстановления вместо  $T_{\text{В}_i}(\infty)$  задается величина  $T_{\text{В}_i}(\alpha, x_i)$ , найденная из выражения (7).

5. Рассчитываются показатели надежности для КТС в целом по формулам, которые применяются последовательно (рекуррентно), начиная с выделенных групп элементов нижнего уровня (для которых формируется ЗИП). В обобщенном виде представляется оператор формирования результирующего показателя надежности КТС с учетом ЗИП следующим образом:

$$\text{ПН}_{\text{КТС}}(\mathbf{X}, \mathbf{S}, \alpha, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{T}_\text{Р}, T_{\text{Д ЗИП}}, T_{\text{Д ЦБ}}, T_{\text{ЗИП}}) = \Phi(x_i, s_i, \alpha_i, \lambda_i, T_{\text{Р}_i}, T_{\text{Д ЗИП}}, T_{\text{Д ЦБ}}, T_{\text{ЗИП}}), \quad (8)$$

где

$\mathbf{X} = \{x_i, i = \overline{1, n}\}$  — вектор, определяющий состав ЗИП;

$\mathbf{S} = \{s_i, i = \overline{1, N_s}\}$  — множество параметров, определяющее структуру резервированных групп элементов различных уровней, входящих в КТС ( $N_s = 4$  — число используемых типов структур резервирования);

$\alpha$  — параметр, определяющий стратегию пополнения ЗИП;

$\mathbf{\Lambda} = \{\lambda_i, i = \overline{1, n}\}$  — вектор интенсивностей отказов элементов;

$\mathbf{T}_\text{Р} = \{T_{\text{Р}_i}, i = \overline{1, n}\}$  — вектор, определяющий показатели ремонтпригодности элементов КТС;

$T_{\text{Д ЗИП}}$  — средняя продолжительность доставки элемента из ЗИП;

$T_{дцб}$  — средняя продолжительность доставки элемента из центральной базы;

$T_{зип}$  — периодичность пополнения ЗИП.

Функционал  $\Phi$  является обобщенным обозначением совокупности операций, зависящей от надежностной структуры КТС  $S$ , и может быть реализован как вручную (что, очевидно, неудобно и громоздко), так и программно.

## Расчет показателей достаточности ЗИП

Для показателей достаточности введем следующие обозначения:

$P_{зип_i}(t/\alpha_i, x_i)$  — вероятность достаточности ЗИП для  $i$ -й группы элементов (для  $i$ -го типа элементов);

$K_{г зип_i}(\alpha_i, x_i)$  — коэффициент готовности ЗИП для  $i$ -й группы элементов.

Формулы для расчета показателей достаточности при различных способах пополнения ЗИП  $\alpha$  имеют вид [3]:

1) *периодическое пополнение* ( $\alpha = 1$ ). Группу однотипных элементов совместно с ЗИП в данном случае можно рассматривать как невосстанавливаемую резервированную систему. Отказ системы наступает в случае, когда исчерпан резерв (ЗИП). Таким образом, вероятность достаточности ЗИП для  $i$ -й группы элементов можно определить как вероятность безотказной работы системы в течение времени, равного периоду пополнения ЗИП  $T_{зип}$ . Если в системе (в  $i$ -й группе элементов)  $n_i$  основных элементов и  $x_i$  резервных элементов, то вероятность безотказной работы  $i$ -й группы в течение времени (наработки)  $T$  равна:

$$P_{зип_i}(T/\alpha = 1, x_i) = P_{зип_i}(T/x_i) = 1 - I(A_i, x_i + 1), \quad (9)$$

где  $T$  — период пополнения ЗИП;

$A_i = n_i \lambda_i T$  — средний расход элементов  $i$ -го типа в течение времени  $T$ ;

$I(A_i, x_i)$  — функция Гамма-распределения, которая определяется следующим выражением:

$$I(A_i, x_i) = 1 - \sum_{s=0}^{x_i} \frac{A_i^s}{s!} e^{-A_i}. \quad (10)$$

Функция  $I(A_i, x_i + 1)$  — это вероятность того, что в течение наработки  $T$  откажут  $x_i + 1$  элементов, отказы которых независимы и подчинены экспоненциальному закону распределения с параметром  $n_i \lambda_i$ .

Для невосстанавливаемой системы коэффициент готовности совпадает с вероятностью безотказной работы. Поэтому коэффициент готовности ЗИП можно определить путем усреднения вероятности безотказной работы на периоде пополнения ЗИП  $T$ . При этом получим:

$$\begin{aligned}
 K_{\Gamma \text{ЗИП}_i}(\alpha_i = 1, x_i, T) &= \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{ЗИП}_i}(t, x_i) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (1 - I(n_i \lambda_i t)) dt = \\
 &= 1 - I(A_i, x_i) + \frac{x_i + 1}{A_i} I(A_i, x_i + 1); \tag{11}
 \end{aligned}$$

2) *пополнение с экстренными доставками* ( $\alpha = 2$ ). Так как экстренные доставки осуществляются уже после отказа системы (группы элементов), вероятность достаточности ЗИП при экстренных доставках определяется также, как и при периодическом пополнении (9). Коэффициент готовности ЗИП при экстренных доставках определяется из выражения:

$$K_{\Gamma \text{ЗИП}_i}(\alpha = 2, x_i, T, \bar{T}_{\text{Э.д.}}) \approx 1 - \frac{\bar{T}_{\text{Э.д.}}}{2T(1 + 1/x_i)} \left( \frac{2A_i}{x_i} - 1 + e^{-\frac{2A_i}{x_i}} \right), \tag{12}$$

где  $\bar{T}_{\text{Э.д.}}$  — средняя продолжительность экстренной доставки;

3) *непрерывное пополнение* ( $\alpha_i = 3$ ). В случае непрерывного пополнения запасов пополнение производится после каждого отказа элемента, входящего в комплект ЗИП. Вероятность достаточности в этом случае ЗИП определяется также по формуле (9). Коэффициент готовности ЗИП определяется по следующей формуле:

$$K_{\Gamma \text{ЗИП}_i}(\alpha_i = 3, x_i) = 1 - \frac{\gamma_i^{x_i+1}}{(x_i + 1)!} \bigg/ \sum_{s=0}^{x_i+1} \frac{\gamma_i^s}{s!}, \tag{13}$$

где  $\gamma_i = \lambda_i T_{\text{ДЦБ}}$ , так как доставка каждого элемента осуществляется из центральной базы.

### Пример расчета ЗИП

Рассмотренная методика расчета ЗИП реализована программно. Для примера возьмем упрощенный вариант состава и структуры КТС, что позволит получить легко интерпретируемые результаты и сделать выводы об адекватности модели и алгоритмов, реализующих методику.

Упрощенный вариант ССН КТС, используемый в примере, показан на рис. 2. В табл. 1 приведена расшифровка сокращений наименований элементов, а также данные о надежности и стоимости комплектующих элементов.

Согласно рис. 2 ССН КТС представляет собой последовательное соединение четырех отдельных элементов: Мод, Мрш, Ком и БП, и двух резервированных групп элементов: РГ1 и РГ2.



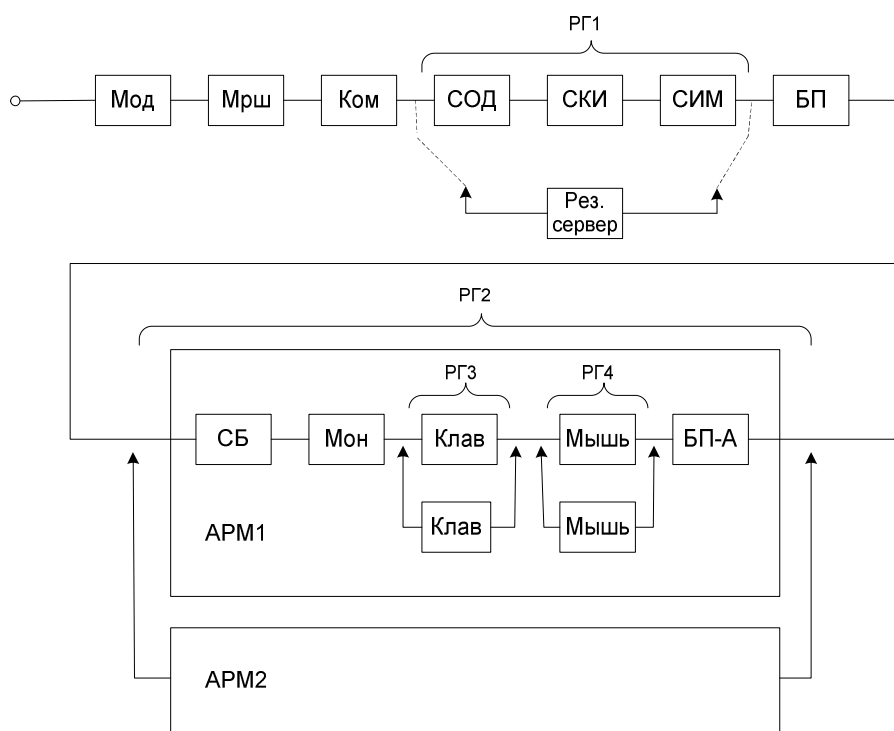


Рис. 2. ССН для КТС (пример)

Таблица 1. Наименование, надежность и стоимость элементов КТС

| Сокращенное наименование    | Полное наименование  | Интенсивность отказов, $\lambda_i \cdot 10^{-5}$<br>1/ч | Стоимость, у.е. |
|-----------------------------|--|---|-----------------|
| <b>Мод.</b>                 | Модем  | 10  | 300             |
| <b>Мрш.</b>                 | Маршрутизатор  | 10  | 1000            |
| <b>Ком.</b>                 | Коммутатор   | 5   | 500             |
| <b>СОД,<br/>СКИ<br/>СИМ</b> | Сервер обмена данными<br>Сервер обработки координатной информации<br>Сервер информационных моделей | 5   | 5000            |
| <b>БП</b>                   | Блок питания   | 10  | 500             |
| <b>АРМ</b>                  | Автоматизированное рабочее место   | –   | –               |
| <b>СБ</b>                   | Системный блок   | 10  | 1000            |
| <b>Мон.</b>                 | Монитор  | 10  | 800             |
| <b>Клав.</b>                | Клавиатура   | 10  | 50              |
| <b>Мышь</b>                 | Мышь   | 10  | 20              |
| <b>БП-А</b>                 | Блок питания АРМ   | 10  | 300             |

РГ1 состоит из 4-х однотипных серверов, соединенных (по надежности) по схеме нагруженного резерва « $k$  из  $N$ », где  $k$  — число основных элементов, а  $N$  — общее число элементов в группе ( $k = 3, N = 4$ ).

РГ2 состоит из 2-х АРМ, соединенных по схеме ненагруженного дублирования. Каждое из АРМ представляется последовательным соединением трех элементов: СБ, Мон. и БП-А и двух резервированных групп:

РГ3 и РГ4. Каждая из групп представляют собой ненагруженное дублирование двух элементов (РГ3 — Клавиатура, РГ4 — Мышь).

Элементы, которые потенциально могут включаться в ЗИП, перечислены в табл. 1.

В состав ЗИП последовательно включаются элементы, добавление которых приводит к максимальному приращению показателей надежности КТС. После каждого шага добавления элемента пользователь оценивает достаточность достигнутого значения показателей и суммарную стоимость ЗИП. Как только будут достигнуты значения показателей надежности и стоимости, удовлетворяющие требованиям пользователя, процесс формирования ЗИП завершается.

Для расчетов задавались следующие временные параметры:

$T_{\text{зип}} = 1$  год — период пополнения ЗИП;

$T_{\text{эп}} = 6$  ч — время экстренного пополнения ЗИП;

$T_{\text{д зип}} = 0,5$  ч — время доставки элемента из ЗИП;

$T_{\text{д цб}} = 6$  ч — время доставки элемента из центральной базы.

Расчеты производились для трех рассматривавшихся выше стратегий пополнения ЗИП: периодическое пополнение, пополнение при экстренной доставке, непрерывное пополнение.

В табл. 2, 3 и 4 приведены результаты, полученные в процессе формирования ЗИП для этих трех стратегий. Данные приведены для 15 шагов процесса формирования ЗИП, что вполне достаточно для определения закономерностей и тенденций процесса. На рис. 3 приведены графики зависимости стоимости ЗИП  $C_{\text{зип}}$  от суммарного числа элементов в ЗИП  $N_{\text{зип}}$ .

Полученные данные соответствуют физическим представлениям о процессах расходования и пополнения ЗИП. Так, оказывается, что при периодическом пополнении ЗИП коэффициент готовности  $K_{\text{Г КТС}}$  оказывается очень низким — при «пустом» ЗИП  $K_{\text{Г КТС}} = 0,3644$ , и при числе элементов в ЗИП  $N_{\text{зип}} = 15$  достигает только значения  $K_{\text{Г КТС}} = 0,9322$ . Это объясняется тем, что согласно стратегии периодического пополнения ЗИП после каждого отказа система остается неработоспособной в течение всего времени до момента очередного пополнения ЗИП.

В случае стратегии пополнения ЗИП с экстренными доставками величина  $K_{\text{Г КТС}}$  изменяется в небольших пределах — от 0,99738 до 0,99939 при изменении числа элементов в ЗИП от 0 до 15 (при  $T_{\text{эп}} = 6$  ч).

Таблица 2. Данные, описывающие процесс формирования ЗИП  
(стратегия периодического пополнения,  $\alpha = 1$ )

| Суммарное<br>число эле-<br>ментов в<br>ЗИП | Число типов элементов в ЗИП |      |      |    |       |    |      |      |       |      | Коэффици-<br>ент готов-<br>ности КТС<br>$K_{ГКТС}$ | Стои-<br>мость<br>ЗИП<br>$C_{ЗИП}$ |
|--|-----------------------------|------|------|----|-------|----|------|------|-------|------|--|------------------------------------|
|  | Мод.                        | Мрш. | Ком. | БП | Серв. | СБ | Мон. | БП-А | Клав. | Мышь |  |                                    |
| 0  |                             |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,3614   | 0                                  |
| 1  | 1                           |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,4122   | 300                                |
| 2  | 1                           | 1    |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,4745   | 1300                               |
| 3  | 1                           | 1    |      | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,5589   | 1800                               |
| 4  | 1                           | 1    | 1    | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,6233   | 2300                               |
| 5  | 1                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  |      |      |       |      | 0,6532   | 3300                               |
| 6  | 2                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  |      |      |       |      | 0,6849   | 3600                               |
| 7  | 2                           | 2    | 1    | 1  |       | 1  |      |      |       |      | 0,7199   | 4600                               |
| 8  | 2                           | 2    | 1    | 2  |       | 1  |      |      |       |      | 0,7586   | 5100                               |
| 9  | 2                           | 2    | 1    | 2  |       | 1  | 1    |      |       |      | 0,8013   | 5900                               |
| 10   | 2                           | 2    | 1    | 2  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,8448   | 6200                               |
| 11   | 2                           | 2    | 1    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,8761   | 11200                              |
| 12   | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,8944   | 11700                              |
| 13   | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    | 1     |      | 0,9076   | 11750                              |
| 14   | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    | 1     | 1    | 0,9200   | 11780                              |
| 15   | 3                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    | 1     | 1    | 0,9322   | 12080                              |

Таблица 3. Данные, описывающие процесс формирования ЗИП  
(стратегия пополнения при экстренных доставках,  $\alpha = 2$ )

| Суммарное<br>число эле-<br>ментов в<br>ЗИП | Число типов элементов в ЗИП |      |      |    |       |    |      |      |       |      | Коэффици-<br>ент готовно-<br>сти КТС<br>$K_{ГКТС}$ | Стои-<br>мость<br>ЗИП<br>$C_{ЗИП}$ |
|--|-----------------------------|------|------|----|-------|----|------|------|-------|------|--|------------------------------------|
|  | Мод.                        | Мрш. | Ком. | БП | Серв. | СБ | Мон. | БП-А | Клав. | Мышь |  |                                    |
| 0  |                             |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,99738  | 0                                  |
| 1  | 1                           |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,99782  | 300                                |
| 2  | 1                           | 1    |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,99825  | 1300                               |
| 3  | 1                           | 1    |      | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,99869  | 1800                               |
| 4  | 1                           | 1    | 1    | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,99894  | 2300                               |
| 5  | 2                           | 1    | 1    | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,99903  | 2600                               |
| 6  | 2                           | 2    | 1    | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,99913  | 3600                               |
| 7  | 2                           | 2    | 1    | 2  |       |    |      |      |       |      | 0,99922  | 4100                               |
| 8  | 2                           | 2    | 2    | 2  |       |    |      |      |       |      | 0,99925  | 4600                               |
| 9  | 3                           | 2    | 2    | 2  |       |    |      |      |       |      | 0,99928  | 4900                               |
| 10   | 3                           | 3    | 2    | 2  |       |    |      |      |       |      | 0,99931  | 5900                               |
| 11   | 3                           | 3    | 2    | 3  |       |    |      |      |       |      | 0,99934  | 6400                               |
| 12   | 4                           | 3    | 2    | 3  |       |    |      |      |       |      | 0,99935  | 6700                               |
| 13   | 4                           | 4    | 2    | 3  |       |    |      |      |       |      | 0,99937  | 7700                               |
| 14   | 4                           | 4    | 2    | 4  |       |    |      |      |       |      | 0,99938  | 8200                               |
| 15   | 4                           | 4    | 3    | 4  |       |    |      |      |       |      | 0,99939  | 8700                               |

Таблица 4. Данные, описывающие процесс формирования ЗИП (стратегия непрерывного пополнения,  $\alpha = 3$ )

| Суммарное число элементов в ЗИП | Число типов элементов в ЗИП |      |      |    |       |    |      |      |       |      | Коэффициент готовности КТС $K_{ГКТС}$ | Стоимость ЗИП $C_{ЗИП}$ |
|---------------------------------|-----------------------------|------|------|----|-------|----|------|------|-------|------|---------------------------------------|-------------------------|
|                                 | Мод.                        | Мрш. | Ком. | БП | Серв. | СБ | Мон. | БП-А | Клав. | Мышь |                                       |                         |
| 0                               |                             |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,997205                              | 0                       |
| 1                               | 1                           |      |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,997901                              | 300                     |
| 2                               | 1                           | 1    |      |    |       |    |      |      |       |      | 0,998598                              | 1300                    |
| 3                               | 1                           | 1    |      | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,999296                              | 1800                    |
| 4                               | 1                           | 1    | 1    | 1  |       |    |      |      |       |      | 0,999646                              | 2300                    |
| 5                               | 1                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  |      |      |       |      | 0,999647                              | 3300                    |
| 6                               | 1                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  | 1    |      |       |      | 0,999648                              | 4100                    |
| 7                               | 1                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999649                              | 4400                    |
| 8                               | 2                           | 1    | 1    | 1  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999649                              | 4700                    |
| 9                               | 2                           | 2    | 1    | 1  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999649                              | 5700                    |
| 10                              | 2                           | 2    | 1    | 2  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999649                              | 6200                    |
| 11                              | 2                           | 2    | 2    | 2  |       | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999650                              | 6700                    |
| 12                              | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 1  | 1    | 1    |       |      | 0,999650                              | 11700                   |
| 13                              | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 2  | 1    | 1    |       |      | 0,999650                              | 12700                   |
| 14                              | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 2  | 2    | 1    |       |      | 0,999650                              | 13500                   |
| 15                              | 2                           | 2    | 2    | 2  | 1     | 2  | 2    | 2    |       |      | 0,999650                              | 13800                   |

$C_{ЗИП}$ , у.е.

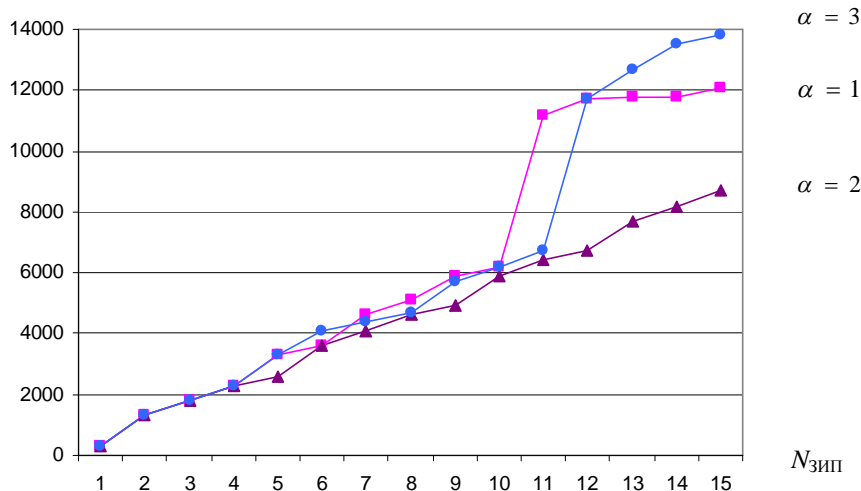


Рис. 3. Зависимость стоимости ЗИП от суммарного числа элементов при различных стратегиях пополнения

Если время задержки при экстренном пополнении увеличить до 3 суток ( $T_{ЭП} = 72$  ч), величина коэффициента готовности  $K_{ГКТС}$  уменьшается и изменяется в пределах соответственно от 0,97497 до 0,99839. В случае стратегии непрерывного пополнения при «пустом» ЗИП  $K_{ГКТС} = 0,997205$ , и уже при  $N_{ЗИП} = 10-11$  достигается предельное значение  $K_{ГКТС} = 0,99965$ , соответствующее значению коэффициента готовности при неограниченном ЗИП.

Из табл. 2–4 видно, что распределение «оптимального» количества элементов в ЗИП не зависит от стратегии пополнения при числе элементов в ЗИП  $N_{\text{ЗИП}} < 5$ . При больших значениях  $N_{\text{ЗИП}}$  распределения различаются, что объясняется различной динамикой изменения состава ЗИП во времени в процессе эксплуатации КТС.

Полученные в данном примере результаты дают полное представление о процессе формирования ЗИП при различных стратегиях его пополнения. В действительности, могут встречаться и другие, промежуточные варианты стратегий. Но, очевидно, что любые из них будут находиться в пределах, ограниченных крайними стратегиями — периодическое пополнение (наихудший случай) и непрерывное пополнение (наилучший случай). На основании получаемых данных пользователь сам может принять решение о рациональном составе ЗИП.

Если прогнозируемая ситуация более близка к стратегии периодического пополнения (большая удаленность от ЦБ, невозможность быстрой доставки по тем или иным причинам), то критическими факторами, влияющими на требуемый состав ЗИП, будут оба фактора — требования к надежности КТС и ограничения стоимости. Так, в рассматриваемом примере при стратегии периодического пополнения для обеспечения  $K_{\text{ГКТС}} \geq 0,9$  потребуется не менее  $N_{\text{ЗИП}} = 13$  запасных элементов (табл. 2), и стоимость ЗИП при этом будет  $C_{\text{ЗИП}} = 12000$  у.е.

Если прогнозируется возможность сравнительно быстрой доставки запасных элементов из ЦБ (небольшие расстояния, наличие дешевого транспортного средства и т.п.), то эта ситуация ближе соответствует стратегии непрерывного пополнения. В этой ситуации требования к ЗИП становятся менее жесткими, так как за счет быстрой доставки высокий уровень надежности обеспечивается при значительно меньшем объеме ЗИП. Так, в условиях непрерывного пополнения коэффициент готовности  $K_{\text{ГКТС}} = 0,9996$  обеспечивается уже при количестве запасных элементов  $N_{\text{ЗИП}} = 4$  (табл. 4). Соответственно этому существенно сокращается и стоимость ЗИП  $C_{\text{ЗИП}} = 2300$  у.е.

Рассмотренный пример и анализ результатов расчетов ЗИП, показывает, что данная методика является удобным инструментом анализа возможной потребности в ЗИП в различных условиях эксплуатации КТС. Окончательное решение о требуемой комплектации ЗИП может принять пользователь с учетом реальных требований к надежности КТС и ограничений стоимости.

1. *Буточнов А.Н.* Оценка надежности многофункциональных программно-технических комплексов / А.Н. Буточнов, В.В. Августовский, В.Н. Цыцарев // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2008. — Т. 10, № 1. — С. 80–90

2. *Козлов Б.А.* Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. — М.: Советское радио, 1975. — 472 с.

3. *Черкесов Г.Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие / Г.Н. Черкесов. — СПб.: Питер, 2005. — 479 с.

Поступила в редакцию 18.06.2008