УДК 681.3 DOI: 10.18698/2308-6033-2020-8-2009

Методы обоснования количественного состава и оценки значений показателей надежности технических объектов вычислительной сети летательных аппаратов

© С.А. Журбин[1], Г.В. Казаков[1], В.В. Корянов[2]

[1]ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, Московская обл., г. Королёв, 141091, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

При проектировании сложных организационно-технических систем одним из главных критериев качества является удовлетворение требований, предъявляемых к показателям, характеризующим оперативно-технический уровень системы. Задача обоснования этих требований решается эмпирическим путем или с использованием аппарата экспертного анализа, что связано с проблемами в области формализации процессов, протекающих в сложных технических системах, трудностями, возникающими при построении математических моделей и определении критериев, позволяющих оптимизировать информационную, техническую, программную, лингвистическую и другие структуры АСУ. Рассмотрен подход к решению задачи обоснования требований к показателям надежности технических средств организационно-технической системы с использованием аппарата непрерывных процессов Маркова. В качестве показателей надежности использовали время наработки на отказ и время восстановления технических средств. Представлено аналитическое решение задачи обоснования требований к показателям надежности технических средств и характеристикам их производительности, а также количеству автоматизированных рабочих мест вычислительной сети, необходимых для удовлетворения предъявляемых интегральных требований к автоматизированным системам управления.

Ключевые слова: *время восстановления, время наработки на отказ, Марковский процесс, надежность, оперативность, техническая система, технический объект, условная вероятность*

Введение. Проблема обоснования требований к структуре и составу сложной автоматизированной системы, качеству технических средств, составляющих техническое обеспечение системы, показателям их надежности и быстродействию во многих источниках рассматривается с точки зрения повышения либо производительности [1–4], либо надежности [5–8] технических средств. Отсутствие системного подхода в рассмотрении этой проблемы является причиной необоснованности проектных решений. Часто разработка автоматизированных систем управления (АСУ) сводится к интуитивному перебору возможных вариантов организационно-технического воплощения генерального замысла создания системы.

Цель статьи — на основе аппарата непрерывных процессов Маркова получить аналитическое решение задачи обоснования требований к показателям надежности технических средств и характеристикам их производительности, а также количеству автоматизированных рабочих мест вычислительной сети, необходимых для удовлетворения предъявляемых интегральных требований к автоматизированным системам управления.

Настоящая статья является логическим и методическим продолжением работ [9, 10], поэтому здесь рассмотрена АСУ, имеющая архитектуру вычислительной сети (ВС) из n автоматизированных рабочих мест (АРМ) с равными правами, что позволяет на каждом АРМ решать как задачи системы, так и задачи, распределенные на другие АРМ. Общая схема такой ВС представлена на рис. 1.

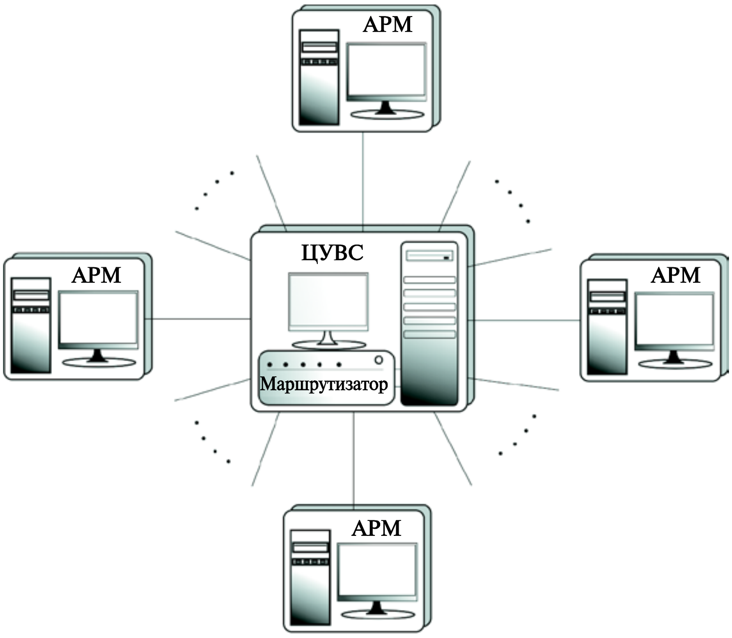

Рис. 1. Пример однородной технической системы:
АРМ — автоматизированное рабочее место;
ЦУВС — центр управления вычислительной сетью

Предъявление требований к сложным АСУ и их составным частям — сложная многоуровневая задача. На высших уровнях иерархии задаются интегральные свойства АСУ, например оперативность, устойчивость, гибкость, защищенность и т. д. Совокупность показателей, относящихся к указанным свойствам системы, определяет качество функционирования автоматизированной системы. Основанием для предъявления требований к интегральным показателям, характеризующим свойства системы, являются:

- условия функционирования системы;
- стратегические задачи, решаемые системой;
- важность обрабатываемой информации;
- ожидаемый эффект от применения системы.

На основе интегральных показателей в соответствии с детализацией системы вырабатываются более частные требования к видам обеспечения АСУ, ее составным частям, элементам и деталям.

Метод определения количественного состава и требуемых значений показателей надежности технических объектов однородной вычислительной сети. При проектировании и разработке автоматизированных систем специального назначения заказчик, как правило, заинтересован в уменьшении времени реализации автоматизируемого процесса, поэтому предъявляет требования к времени решения поставленных задач.

Время решения задач в системе — один из показателей, характеризующий свойство автоматизированной системы «оперативность». Совокупность свойств системы, выраженных через множество показателей, определяет качество функционирования АСУ (рис. 2).

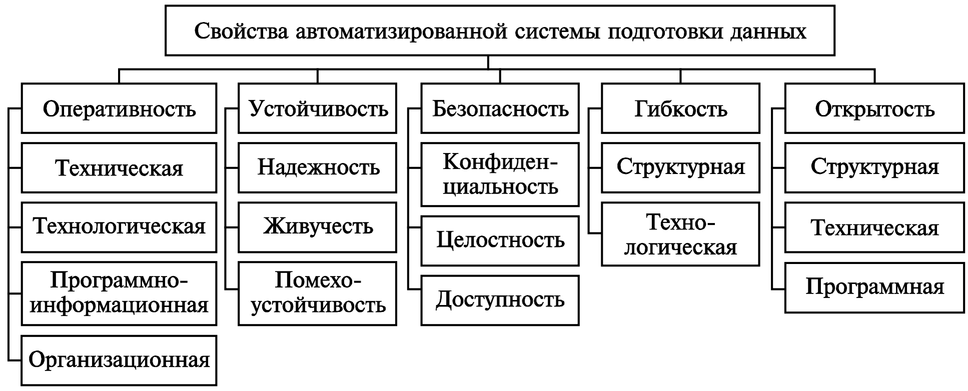

Рис. 2. Свойства автоматизированной системы

Под оперативностью АСУ понимается свойство системы, относящееся к ее быстродействию, скорости выполнения возложенных на систему функций. Скорость работы системы наиболее явно выражается временем выполнения возложенных на систему функций в ходе решения некоторого заданного количества задач. Разовое выполнение системой возложенных функций при решении заданного комплекса задач в статье называется реализацией. В результате воздействия некоторых факторов — возмущений — время решения заданного комплекса задач может отличаться для различных реализаций. Возмущения могут быть:

- естественными, например процесс отказа технических объектов вследствие старения;
- искусственными, например процесс воздействия нарушителя на систему.

Закономерности функционирования технических объектов при воздействии искусственных возмущений требуют дополнительных исследований и в настоящей статье не рассматриваются.

Поскольку время решения задач системой различно в зависимости от реализаций, в качестве основного показателя оперативности следует использовать математическое ожидание времени решения заданного количества задач в системе в условиях возмущений:

$$m_s(t) = \sum_{i=1}^{2^n} \tau_i P_i(t), \qquad (1)$$

где $m_s(t)$ — математическое ожидание времени решения заданного количества задач; τ_i — время, за которое в системе решается заданное количество задач в i-й реализации; $P_i(t)$ — вероятность того, что задачи в системе решались в i-й реализации.

Для организационно-технической системы, которой является АСУ, математическое ожидание (1) запишем в форме

$$m_s(t) = m_{\text{р.о}}(t) + m_{\text{м.о}}(t),$$

где $m_{\text{р.о}}(t)$ — математическое ожидание времени ручных операций, т. е. операций, проводимых человеком без средств автоматизации; $m_{\text{м.о}}(t)$ — математическое ожидание времени машинных операций, т. е. время работы средств автоматизации. Величина $m_{\text{р.о}}(t)$ зависит от скорости выполнения персоналом ручных операций и технологии автоматизируемого процесса, поэтому при неизменности технологии имеет некоторый предел, достигаемый персоналом при выполнении ручных операций. Величина $m_{\text{м.о}}(t)$ имеет тенденцию к уменьшению по мере совершенствования технических средств, и в настоящей работе именно эта величина интересует нас более всего. В дальнейших рассуждениях будет учитываться именно величина $m_{\text{м.о}}(t)$, тогда будем использовать $m_s(t) = m_{\text{м.о}}(t)$.

Рассмотрим реализацию процесса решения заданного количества задач в системе. В процессе функционирования АСУ каждый технический объект может находиться в двух состояниях:

- в состоянии работоспособности;
- состоянии восстановления после отказа.

Тогда вся система может находиться в 2^n состояниях [9], которые удобно представить в виде направленного графа состояний (рис. 3).

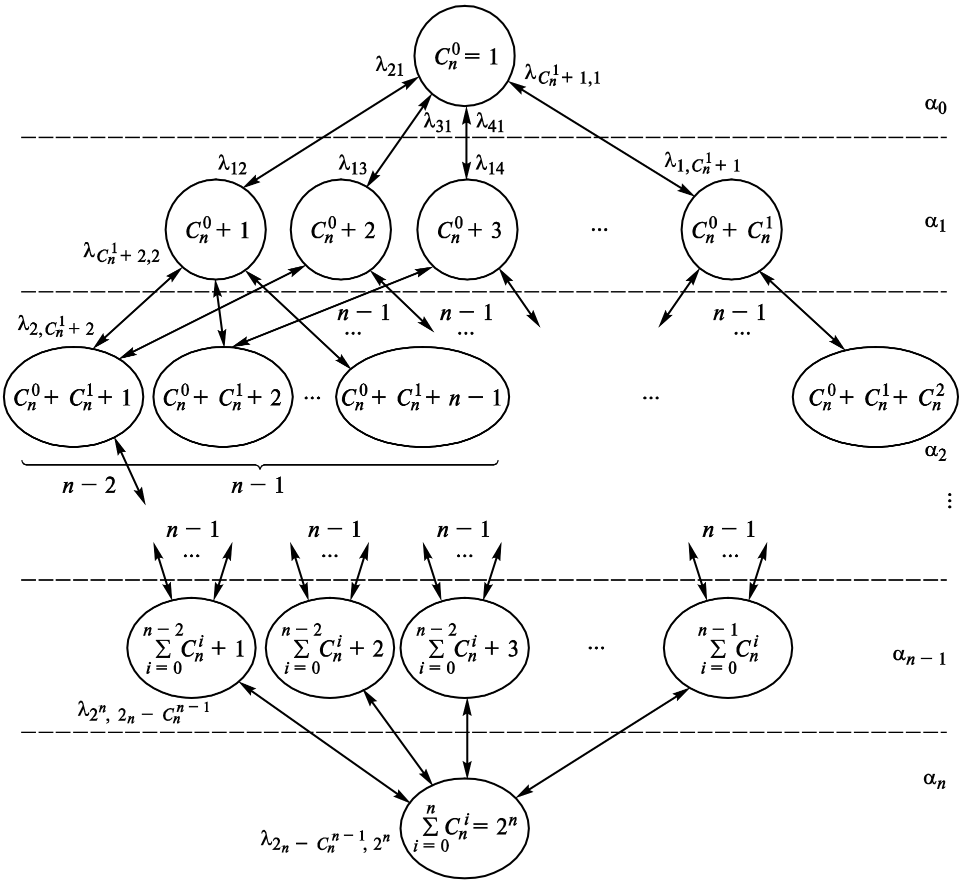

Рис. 3. Граф состояний G технической системы, состоящей из n автоматизированных рабочих мест

Вершинами графа являются состояния технической системы S_i, дуги графа с весами описывают процесс перехода технической системы из состояния в состояние, веса характеризуют интенсивности перехода из одного состояния в другое, т. е. $\lambda_{i,k}$ — интенсивность перехода из состояния S_i в состояние S_k. Для того чтобы не загромождать рис. 3 обозначениями, в вершины графа G вписаны номера состояний системы, состояния обозначены S_i $(i = \overline{1,\ 2^n})$. Каждое состояние характеризуется количеством АРМ, находящихся в работоспособном состоянии к некоторому моменту времени t, и количеством АРМ, находящихся в состоянии восстановления после отказа:

S_1 — все n АРМ системы в работоспособном состоянии;

S_2 — первый АРМ в состоянии восстановления после отказа, остальные — в работоспособном состоянии;

$S_{C_n^1+C_n^0}$ — АРМ с номером n в состоянии восстановления после отказа, остальные — в работоспособном состоянии;

$S_{C_n^1+C_n^0+1}$ — первый и второй АРМ в состоянии восстановления после отказа, остальные — в работоспособном состоянии;

S_{2^n} — все n АРМ в состоянии восстановления после отказа.

Таким образом, граф G представляет полное множество состояний случайного процесса отказов и восстановлений. Каждое состояние может быть описано двумя величинами:

$P_i(t)$ — вероятность нахождения АСУ в состоянии S_i к некоторому моменту времени t;

τ_i — время решения заданного количества задач системой, находящейся в состоянии S_i.

Тогда под i-й реализацией процесса решения заданного количества задач системой будем понимать решение задач системой, когда она находится в состоянии S_i.

Нахождение системы в состоянии S_i является случайным событием s_i. Все множество событий $\{s_i\}_{i=1}^{2^n}$ составляет полную группу несовместных событий, для которой справедливо (1). Однако выражение (1) не имеет смысла, поскольку для состояния S_{2^n}, соответствующего событию s_{2^n}, время $\tau_{2^n} = \infty$, так как в состоянии S_{2^n} все n АРМ находятся в неработоспособном состоянии. Просто не учитывать состояние S_{2^n} нельзя, поскольку $m_s(t)$ рассчитывается только для полной группы событий, т. е. должно выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^{2^n} P_i(t) = 1. \tag{2}$$

Перепишем (2) в виде

$$\sum_{i=1}^{2^n-1} P_i(t) = 1 - P_{2^n}(t). \tag{3}$$

Разделим правую и левую стороны равенства (3) на $1 - P_{2^n}(t)$, тогда

$$\frac{1}{1-P_{2^n}(t)} \sum_{i=1}^{2^n-1} P_i(t) = \frac{P_1(t)}{1-P_{2^n}(t)} + \frac{P_2(t)}{1-P_{2^n}(t)} + \ldots + \frac{P_{2^n-1}(t)}{1-P_{2^n}(t)} = 1.$$

Однако в соответствии с [11] выражение

$$P(s_i \mid \bar{s}_{2^n}) = \frac{P_i(t)}{1 - P_{2^n}(t)}, \ i = \overline{1, 2^n - 1} \qquad (4)$$

обозначает условную вероятность того, что система находится в состоянии S_i $(i = \overline{1, 2^n - 1})$, если хотя бы одно АРМ находится в работоспособном состоянии. Таким образом, преобразовали множество несовместных событий $Z = \{s_i\}_{i=1}^{2^n}$ в множество несовместных событий $U = \left\{s_i \mid \bar{s}_{2^n}\right\}_{i=1}^{2^n - 1}$, учитывая, что не произойдет событие s_{2^n}. Множество U составляет полную группу событий, для которой математическое ожидание вычисляется с помощью выражения

$$m_s(t) = \frac{1}{1 - P_{2^n}(t)} \sum_{i=1}^{2^n - 1} \tau_i P_i(t). \qquad (5)$$

Здесь рассмотрен частный случай, когда только в состоянии S_{2^n} система не может выполнить поставленные задачи, т. е. $\tau_{2^n} = \infty$. В более общем случае таких состояний может быть несколько, и они представляют некоторое множество W. Тогда (4) запишем в виде

$$P(s_i \mid \bar{s}_j, \bar{s}_{j+1}, \ldots, \bar{s}_{2^n}) = \frac{P_i(t)}{1 - \sum\limits_{j \in W} P_j(t)}, \ i \in Q,$$

где $P(s_i \mid \bar{s}_j, \bar{s}_{j+1}, \ldots, \bar{s}_{2^n})$ — условная вероятность того, что система будет находиться в состоянии S_i, если система не будет находиться ни в одном из состояний $S_j, S_{j+1}, \ldots, S_{2^n}$, для которых $\tau_j = \infty, \ j \in W$; $P_j(t)$ — вероятность нахождения системы в состоянии S_j $(j \in W)$; Q — множество состояний системы, в которых решаются поставленные задачи.

Тогда для более общего случая (5) примет вид

$$m_s(t) = \frac{1}{1 - \sum\limits_{j \in W} P_j(t)} \sum_{i \in Q} \tau_i P_i(t).$$

В общем случае $P_i(t)$ — это функция переменных λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n}; \ j = \overline{1, 2^n}; i < j)$, λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n}; \ j = \overline{1, 2^n}; i > j)$, t и n, где λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n}; \ j = \overline{1, 2^n}; i < j)$ — интенсивность отказов; λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n};$

$j = \overline{1, 2^n};\ i > j)$ — интенсивность восстановлений; t — переменная, определяющая производительность АРМ (с учетом ограничений, представленных ниже); n — количество АРМ вычислительной сети. Пусть для $m_s(t)$ в соответствии с предъявляемым требованием будет справедливо неравенство

$$m_s(t) \le T_з. \tag{6}$$

Необходимо найти значения λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n};\ j = \overline{1, 2^n};\ i < j)$ и λ_{ij} $(i = \overline{1, 2^n};\ j = \overline{1, 2^n};\ i > j)$, t и n, при которых выполнится неравенство (6). Искомые значения являются решением следующей системы уравнений при условии выполнения допущений и ограничений, принятых в [9, 10],

$$\begin{cases} \dfrac{1}{1 - \sum\limits_{j \in W} P_j(T_з)} \sum\limits_{i \in Q} \tau_i P_i(T_з) = T_з; \\ \dfrac{1}{1 - \sum\limits_{j \in W} P_j(T_з)} \sum\limits_{i \in Q} P_i(T_з) = 1, \end{cases} \tag{7}$$

где второе уравнение является условием, определяющим полноту множества случайных событий.

Решение системы (7) определяет значения $\lambda_{ij}\ (i = \overline{1, 2^n};$ $j = \overline{1, 2^n};\ i < j)$ и $\lambda_{ij}\ (i = \overline{1, 2^n};\ j = \overline{1, 2^n};\ i > j)$, которые являются пограничными, т. е. значения интенсивностей отказов (восстановлений) меньше (больше) полученных, и тем более удовлетворяют условию (6).

При решении задачи (7) были приняты следующие ограничения и допущения:

- поток отказов и восстановлений объектов считается простейшим и подчиняется экспоненциальному закону распределения [12–18];
- интервал времени, в течение которого происходит переход системы из одного состояния в другое, является непрерывным;
- выход из строя двух или более технических объектов в один и тот же момент времени t считается событием невозможным;
- интенсивности отказов (восстановлений) для всех технических средств приняты равными;
- быстродействие идентичных технических средств для различных АРМ принято равным;
- объект переходит в состояние восстановления сразу, как только он вышел из строя.

С учетом изложенного выше можно записать, что

$$\lambda_{ij} = \lambda \text{ для } (i = \overline{1, 2^n};\ j = \overline{1, 2^n};\ i < j)$$

и

$$\lambda_{ij} = \mu \text{ для } (i = \overline{1, 2^n};\ j = \overline{1, 2^n};\ i > j).$$

Поскольку $P_i(t) = f_i(t, \lambda, \mu)$, то $P_i(T_з) = f_i(T_з, \lambda, \mu)$. Для аналитического решения системы (7) необходимо получить аналитические выражения для $P_i(T_з) = f_i(T_з, \lambda, \mu)$ [9] и τ_i [10]. Исходя из указанных работ запишем следующее:

$$P_k(T_з) = \left(1 - P(T_з)\right)^k P^{n-k}(T_з), \quad k = \overline{0, n},$$

где

$$P(T_з) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)T_з} \text{ и } \tau_k = \frac{\tilde{t}}{k}; \tag{8}$$

$$\left\{S_i\right\}_{i=1+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j}^{\sum_{j=0}^{k} C_n^j} \in \alpha_k \text{ и } P_{1+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j}(T_з) = P_{2+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j}(T_з) = \ldots = P_{\sum_{j=0}^{k} C_n^j}(T_з). \tag{9}$$

Здесь $P_k(T_з)$ — вероятность пребывания АСУ в одном из состояний S_i, принадлежащих уровню α_k (см. рис. 1); $P(T_з)$ — вероятность пребывания любого из АРМ, включенных в АСУ, в работоспособном состоянии (вероятность безотказной работы АРМ); τ_k — время решения заданного количества задач в состоянии S_k (для S_k выполняется условие (9)), т. е.

$$\left\{S_i\right\}_{i=1+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j}^{\sum_{j=0}^{k} C_n^j} \in \alpha_k \text{ и } \tau_{1+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j} = \tau_{2+\sum_{j=0}^{k-1} C_n^j} = \ldots = \tau_{\sum_{j=0}^{k} C_n^j}.$$

Без потери общности рассмотрим случай, когда только в состоянии S_{2^n} $\tau_{2^n} = \infty$. Тогда, обозначив $P(T_з) = P$, запишем

$$T_з = \frac{\tilde{t}}{1 - (1 - P)^n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{C_n^i (1 - P)^i P^{n-i}}{n - i}, \tag{10}$$

где $\tilde{t}$ — время решения заданного количества задач на одном, произвольно взятом АРМ.

Как видно, в выражении (10) параметры $\tilde{t}$, n и P являются неопределенными переменными, что затрудняет решение уравнения.

Представим (10) в более удобном для решения виде:

$$\frac{\tilde{t}}{T_з} = \frac{1-(1-P)^n}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{C_n^i (1-P)^i P^{n-i}}{n-i}}. \tag{11}$$

Зафиксируем значение n. Поскольку речь идет о вычислительной сети, то имеет место неравенство: $n \ge 2$ и $n \in N$, где N — множество целых чисел. Пусть $\frac{\tilde{t}}{T_з} = y$, тогда (11) принимает вид функции от одного переменного

$$y = \frac{1-(1-P)^n}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{C_n^i (1-P)^i P^{n-i}}{n-i}}. \tag{12}$$

Построим графики функции (12) для $n = 2, 3, 4$.

$$\begin{aligned} y &= \frac{2P-4}{3P-4} \ \text{для} \ n = 2; \\ y &= \frac{6P^2-18P+18}{11P^2-27P+18} \ \text{для} \ n = 3; \\ y &= \frac{12P^3-48P^2+72P-48}{25P^3-88P^2+108P-48} \ \text{для} \ n = 4. \end{aligned} \tag{13}$$

Поскольку P — вероятность безотказной работы произвольного АРМ, область изменения P не должна выходить за границы интервала $[0, 1]$, т. е.

$$0 \le P \le 1. \tag{14}$$

Общий вид графиков функций (13) с учетом выполнения условия (14) представлен на рис. 4.

Зависимости (см. рис. 4) используют при проектировании АСУ для выработки обоснованных предложений для принятия решений по количеству АРМ, их минимально возможной производительности и надежности. При условии задания заказчиком требований, предъявляемых к оперативности АСУ, т. е. определения $T_з$, графики позволяют определить:

- минимальное необходимое количество АРМ, входящих в состав АСУ;
- минимально необходимую производительность АРМ;
- минимально допустимую надежность АРМ для показателя надежности «вероятность безотказной работы АРМ».

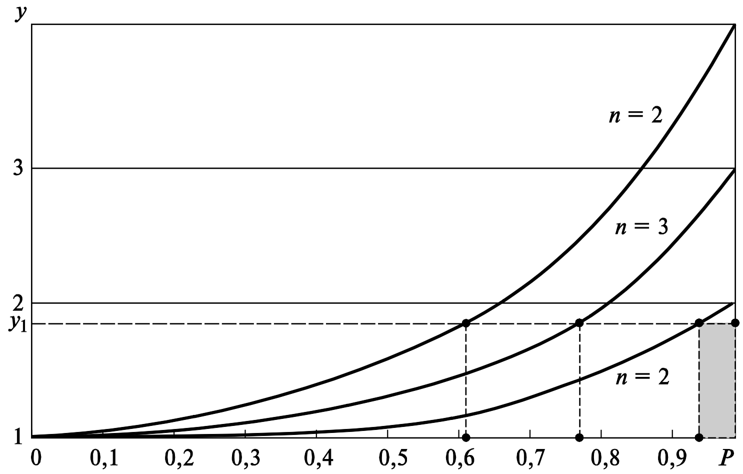

Рис. 4. Зависимость производительности автоматизированных рабочих мест от их надежности

Рассмотрим алгоритм использования зависимостей, представленных на рис. 4. Пусть задано значение $T_з$, т. е. заказчик потребовал, чтобы АСУ, имеющая архитектуру ВС, позволяла решать некоторое заданное количество задач за время, не превышающее $T_з$. Тогда имеем $\dfrac{\tilde{t}}{T_з} = y_1$. Для того чтобы определить y_1, необходимо оценить величину $\tilde{t}$, которая характеризует время решения заданного количества задач на одном АРМ (поскольку АРМ обладают идентичными характеристиками, $\tilde{t}$ будет одинаковым для любого АРМ). Дальнейшие рассуждения могут развиваться с учетом и без учета ограничений на количество АРМ.

Например, у заказчика существуют объекты, на которых предположительно будут размещены технические средства АСУ, тогда количество АРМ не может превышать количества выделенных для этого объектов. Пусть для оснащения АРМ, размещаемых на двух объектах, выбраны известные технические средства (например, ПЭВМ) с определенными характеристиками. Для выбранных технических средств с известными характеристиками оцениваем $\tilde{t}$ и получаем $y_1 = \dfrac{\tilde{t}}{T_з}$, значение которого может удовлетворять одному из двух неравенств

$$\begin{aligned} &1)\ y_1 < 2; \\ &2)\ y_1 \ge 2. \end{aligned} \tag{15}$$

Для первого неравенства (15) значение y_1 подставляем в уравнение (13) при $n = 2$ и получаем значение P. Таким образом, полученные значения $\tilde{t}$ и P — минимально возможные для производительности и надежности технических средств, используемых в оснащении двух АРМ, при которых будет выполняться условие (6).

Пусть $\tilde{t} = 9,9$ мин (расчетное время решения заданного количества задач на одном АРМ), $T_з = 5$ мин (время, заданное заказчиком), тогда $y_1 = \dfrac{9,9}{5} = 1,98$. Подставив y_1 в уравнение (13) для $n = 2$, получим $P = 0,995$. Следовательно, чтобы АСУ, состоящая из двух АРМ, выполняла заданное количество задач за время, не превышающее 5 мин ($T_з \le 5$ мин), необходимо, чтобы каждое АРМ выполняло заданное количество задач за время, не превышающее 9,9 мин, и вероятность пребывания АРМ в работоспособном состоянии была не менее 0,995 (на рис. 4 область допустимых значений выделена серым цветом).

Возможно, что значение y_1 не намного больше 1 и значение P менее 0,5. Такая ситуация говорит о том, что требования заказчика к АСУ чересчур занижены и можно рекомендовать пересмотреть требования в сторону их ужесточения.

Если выполняется второе неравенство (15), тогда производительности АРМ не достаточно для удовлетворения предъявляемых системой требований. Поскольку существует ограничение на количество АРМ ($n = 2$), то для оснащения АРМ следует рассматривать более производительную технику, которая позволит удовлетворить неравенству 1 в (15).

При отсутствии ограничений на количество АРМ, образующих АСУ, справедливы все рассуждения, приведенные выше, за исключением выполнения неравенства 2 из (15). Когда $y_1 \ge 2$, можно рекомендовать заказчику включить в вычислительную сеть АСУ дополнительные АРМ. Количество АРМ обусловливается неравенством

$$y_1 < k,$$

где k — общее количество АРМ АСУ.

Далее подставляем y_1 в выражение (12) при $n = k$ и определяем значение P. После определения минимально допустимого значения вероятности безотказной работы АРМ $P = P(T_з)$ получим оценку значений λ и μ. Исходя из (8) для P запишем

$$P = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)T_з}. \qquad (16)$$

Как видно из выражения (16), получить зависимость λ от μ при известном P в явном виде затруднительно, поэтому рассмотрим способы приближенной оценки их взаимного влияния.

Из статистического анализа отказов и восстановлений технических средств на этапе нормальной эксплуатации известно, что интенсивность восстановления, как правило, на несколько порядков выше, чем интенсивность отказа. Тогда с учетом последнего замечания выражение (16) можно записать в виде

$$P = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \delta(\lambda,\ \mu), \tag{17}$$

где $\delta(\lambda,\ \mu)$ — бесконечно малая величина, которой можно пренебречь, вносит максимальную погрешность при значениях $\mu \le 0,5$, не превышающую 1 %. Тогда, если пренебречь $\delta(\lambda,\ \mu)$, можно выразить зависимость λ от μ:

$$\lambda = \mu\frac{(1-P)}{P}. \tag{18}$$

Общий вид зависимости λ от μ представлен на рис. 5.

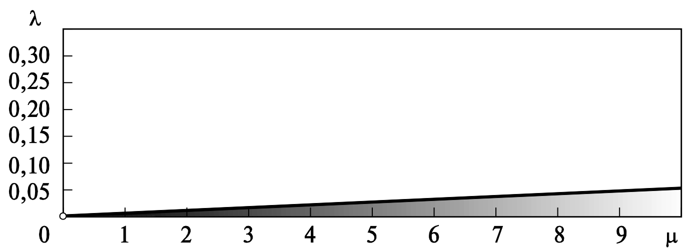

Рис. 5. Зависимость допустимых интенсивностей отказов от интенсивностей восстановлений

Выражение (18) включает множество значений λ и μ, при которых вероятность безотказной работы АРМ (17) будет равна определенному значению (см. рис. 4). Для удовлетворения неравенства (6) необходимо, чтобы реальная интенсивность отказов технических средств не превышала, а интенсивность восстановлений была не ниже полученных значений (на рис. 5 область рекомендуемых значений λ и μ выделена темным цветом).

Заключение. Подход, основанный на аналитическом решении задачи, позволяет вырабатывать обоснованные предложения по количественному составу объектов вычислительной сети, характеристикам производительности и показателям надежности технических средств, определяющих комплектацию АРМ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лобанов А.В., Ашарина И.В. Восстановление целевой работы в автоматической сбое- и отказоустойчивой многозадачной распределенной информационно-управляющей системе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1902

[2] Илюхин С.Н., Клишин А.Н. Оценка производительности бортового вычислителя беспилотного летательного аппарата при реализации процесса наведения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. DOI:10.18698/2308-6033-2018-7-1781

[3] Гончаренко В.А. Метод обоснования производительности информационно-вычислительных систем реального времени с учетом неопределенности параметров. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*, 2015, № 646, с. 128–133.

[4] Снытников А.В. *Исследование производительности высокопроизводительных вычислительных систем*. Дис. … д-ра техн. наук. Новосибирск, 2019, 176 с.

[5] Строгонов А.В., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем. *Компоненты и технологии*, 2007, № 5, с. 183–190.

[6] Кирьянчиков В.А., Москвина Л.К. Методика и программное средство оценки надежности вычислительных систем с помощью структурных схем надежности. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2017, № 8, с. 29–37.

[7] Воеводин В.П. *Эволюция понятия и показателей надежности вычислительных систем*. Препринт ИФВЭ 2012−24. Протвино, 2012, 24 с.

[8] Викторова В.С., Лубков Н.В., Степанянц А.С. *Анализ надежности отказоустойчивых вычислительных систем.* Москва, ИПУ РАН, 2016, 117 с.

[9] Журбин С.А., Казаков Г.В. Подход к обоснованию требований к показателям надежности технических средств АСУ с использованием аппарата непрерывных процессов Маркова. *Труды секции 22 имени академика В.Н. Челомея XLI Академических чтений по космонавтике. Вып. 5*. Реутов, ВПК «НПО машиностроения», 2017, с. 465–481.

[10] Журбин С.А., Казаков Г.В. Применение геометрического метода оперативного управления распределенным решением информационно-расчетных задач в вычислительных сетях на примере трехмашинного комплекса. *Труды секции 22 имени академика В.Н. Челомея XL Академических чтений по космонавтике. Вып. 4*. Реутов, ВПК «НПО машиностроения», 2016, с. 353–363.

[11] Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. Москва, Юстиция, 2018, 658 с.

[12] Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2006, 702 с.

[13] Афанасьев В.Г., Зеленцов В.А., Миронов А.Н. *Методы анализа надежности и критичности отказов сложных систем*. Москва, Министерство обороны, 1992, 100 с.

[14] Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Методы оценки показателей надежности сложных компонентов и систем. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 1–1. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17558 (дата обращения 22.02.2020).

[15] Лаврищева Е.М., Пакулин Н.В., Рыжов А.Г., Зеленов С.В. Анализ методов оценки надежности оборудования и систем. *Практика применения методов. Труды ИСП РАН*, 2018, т. 30, вып. 3, с. 99–120. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8

[16] Бейхельт Ф., Франкен П. *Надежность и техническое обслуживание. Математический подход*. Москва, Радио и связь, 1988, 389 с.

[17] Басманов В.Г., Закалата А.А., Холманских В.М. Математическая модель надежности элементов электроснабжения в период приработки. *Фундаментальные исследования*, 2015, № 5 (часть 2), с. 247–251.

[18] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. *Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ*. Москва, Либроком, 2019, 584 с.

Статья поступила в редакцию 23.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Журбин С.А., Казаков Г.В., Корянов В.В. Методы обоснования количественного состава и оценки значений показателей надежности технических объектов вычислительной сети летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 8. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-8-2009

Журбин Сергей Александрович — старший научный сотрудник ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России. e-mail: ubc4@cnt.ru

Казаков Геннадий Викторович — канд. техн. наук, доцент, начальник управления ФГБУ «4 ЦНИИ» Минобороны России, почетный работник науки и техники Российской Федерации. e-mail: kgv.64@mail.ru

Корянов Всеволод Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

Methods of substantiating the quantitative composition and estimating the values of reliability indicators of technical objects of aircraft computer network

© S.A. Zhurbin [1], G.V. Kazakov[1], V.V. Koryanov[2]

[1] FSBI "The 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation", Korolyov, Moscow region, 141091, Russia
[2] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

When designing complex organizational and technical systems, one of the main quality criteria is to meet the requirements for indicators characterizing the operational and technical level of the system. The task of substantiating these requirements has not been systematically approached. Requirements, most often, are presented empirically or using the apparatus of expert analysis. This is due to problems in the field of formalization of processes occurring in complex technical systems, difficulties arising in the construction of mathematical models and the development of criteria that allow optimizing information, technical, software, linguistic and other structures of ACS. The problem of substantiating the requirements should be solved using a systematic approach, and the whole set of properties, integral and partial indicators of the system should be taken into account. The study focuses on the approach to solving the problem of substantiating the requirements for reliability indicators of technical means of an organizational and technical system using the apparatus of continuous Markov processes. Time between failures and recovery time were used as reliability indicators. As a result, we found an analytical solution to the problem of substantiating the requirements for the reliability indicators of technical means and the characteristics of their performance, as well as the number of computer network workstations, necessary to meet the integral requirements for the ACS.

Keywords: *recovery time, time between failures, Markov process, reliability, efficiency, technical system, technical object, conditional probability*

REFERENCES

[1] Lobanov A.V., Asharina I.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsiya — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1902
[2] Ilukhin S.N., Klishin A.N. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsiya — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-7-1781
[3] Goncharenko V.A. Metod obosnovaniya proizvoditel'nosti informatsionno-vychislitel'nykh sistem real'nogo vremeni s uchetom neopredelennosti parametrov [Method for substantiating the performance of real-time information and computing systems taking into account the uncertainty of parameters]. In: *Trudy Voyenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky], 2015, no. 646, pp. 128–133.
[4] Snytnikov A.V. *Research of the performance of high-performance computing systems. Diss. … Dr. Sci.* (*Engineering*). Novosibirsk, 2019, 176 p.
[5] Strogonov A.V., Zhadnov V.V., Polessky S.N. *Komponenty i tekhnologii — Components and technologies*, 2007, no. 5, pp. 183–190.

[6] Kiryanchikov V.A., Moskvinw L.K. *Izvestiya SPbGETU «LETI»* (*Proceedings of the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"*), 2017, no. 8, pp. 29–37.

[7] Voevodin V.P. Evolyutsiya ponyatiya i pokazateley nadezhnosti vychislitel'nykh sistem [Evolution of the concept and indicators of the reliability of computing systems]. *Preprint IFVE — IHEP Preprint 2012−24*. Protvino, 2012, 24 p.

[8] Viktorova V.S., Lubkov N.V., Stepanyants A.S. *Analiz nadezhnosti otkazoustoychivykh vychislitel'nykh system* [Analysis of the reliability of fault-tolerant computing systems]. Moscow, IPU RAS, 2016, 117 p.

[9] Zhurbin S.A., Kazakov G.V. Podkhod k obosnovaniyu trebovaniy k pokazatelyam nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv ASU s ispolzovaniem apparata nepreryvnykh protsessov Markova [An approach to substantiating the requirements for reliability indicators of technical means of automated control systems using the apparatus of continuous processes Markov]. *Trudy sektsii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XLI Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, vyp. 5* [Proceedings of Section 22 named after Academician V.N. Chelomey of XLI Academic Readings on Astronautics, no. 5]. Reutov, JSC "MIC "Mashinostroyenia" Publ., 2017, pp. 465–481.

[10] Zhurbin S.A., Kazakov G.V. Primenenie geometricheskogo metoda operativnogo upravleniya raspredelennym resheniem informatsionno-raschetnykh zadach v vychislitelnykh setyakh na primere trekhmashinnogo kompleksa [Application of the geometric method of operational control of the distributed solution of information and computational problems in computer networks on the example of a three-machine complex]. *Trudy sektsii 22 imeni akademika V.N. Chelomeya XL Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, vyp. 4*. [Proceedings of Section 22 named after Academician V.N. Chelomey of XL Academic Readings on Astronautics, no. 4]. Reutov, JSC "MIC "Mashinostroyenia" Publ., 2016, pp. 353–363.

[11] Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. 12th ed. Moscow, Yustitsiya, 2018, 658 p.

[12] Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of the theory of reliability]. St. Petersburg, BKhV–Petersburg Publ., 2006, 702 p.

[13] Afanasev V.G., Zelentsov V.A., Mironov A.N. *Metody analiza nadezhnosti i kritichnosti otkazov slozhnykh system* [Methods for analyzing the reliability and criticality of failures of complex systems]. Moscow, Ministry of Defence Publ., 1992, 100 p.

[14] Konesev S.G., Khazieva R.T. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya - Modern problems of science and education*, 2015, no. 1-1. Available at: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=17558 (accessed February 22, 2020).

[15] Lavrishcheva E.M., Pakulin N.V., Ryzhov A.G., Zelenov S.V. *Trudy ISP RAN — Proceedings of ISP RAS*, vol. 30, no. 3, 2018, pp. 99–120. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(3)-8

[16] Beykhelt F., Franken P. *Nadezhnost i tekhnicheskoe obsluzhivanie. Matematicheskii podkhod* [Reliability and maintenance. Mathematical approach]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988, 389 p. (In Russ.)

[17] Basmanov V.G., Zakalata A.A., Kholmanskikh V.M. *Fundamentalnye issledovaniya — Fundamental research*, 2015, no. 5, part 2, pp. 247–251.

[18] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskii analiz* [Mathematical methods in the theory of reliability. Main characteristics of reliability and their statistical analysis]. Moscow, Librokom Publ., 2019, 584 p.

Zhurbin S.A., Senior Research Fellow, FSBI “The 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation”. Author of over 10 papers in the field of reliability of automated control systems. e-mail: ubc4@cnt.ru

Kazakov G.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of Department, FSBI “The 4th Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation”. Author of over 80 papers in the field of reliability of automated control systems. e-mail: kgv.64@mail.ru

Koryanov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, First Deputy Head of the Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 papers. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru