

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОРАЛЬНОГО УСТАРЕВАНИЯ СИСТЕМ СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПО КРИТЕРИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

О. Л. ШЕСТОПАЛОВА

*Московский авиационный институт, филиал „Восход“,  
468320, г. Байконур, Казахстан, Россия  
E-mail: neman2004@mail.ru*

Рассматриваются вопросы прогнозирования морального устаревания систем сбора и обработки информации в космических комплексах. Описаны особенности прогнозирования показателей проектного и остаточного срока морального устаревания на основе моделирования снижения во времени эффективности информационного обеспечения в условиях возрастающих простоев оборудования, вызванных прогрессирующими отказами устаревшей элементной базы.

**Ключевые слова:** система сбора и обработки информации, информационное обеспечение, эффективность информационного обеспечения, моральное устаревание

**Введение.** Управление состоянием космических средств орбитального и наземного базирования (объектов управления) требует регулярного сбора и обработки больших объемов информации  $I_{Oy}(t)$  [1]. В космических комплексах функции сбора и обработки информации выполняют соответствующие системы (ССОИ). Информация, получаемая с помощью ССОИ, необходима для оценки текущего и прогнозного состояния объектов управления и выработки соответствующих управляющих воздействий  $U_{Oy}(t)$ . Цели управления состоят, во-первых, в выполнении алгоритмов функционирования объектов по целевому назначению, во-вторых, в поддержании объектов управления в необходимом техническом состоянии. В обобщенной схеме управления, приведенной на рис. 1, эти функции закреплены за первым (основным) контуром управления.

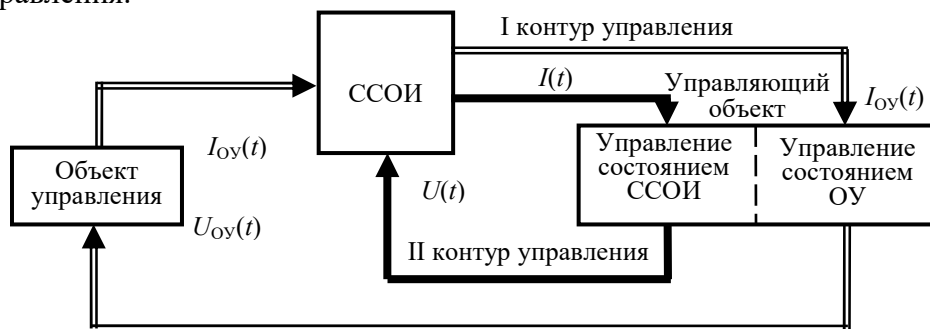


Рис. 1

Очевидно, что эффективность управления состоянием объектов в основном контуре управления напрямую зависит от состояния ССОИ, определяемого ее способностью оперативно предоставлять управляющему объекту необходимые для своевременного принятия решений объемы информации о текущем и прогнозном состоянии объектов [2]. Для управления техническим состоянием ССОИ в схему на рис. 1 введен второй (дополнительный) контур. Задачами данного контура являются выработка и реализация управляющих воздействий  $U(t)$ , позволяющих, во-первых, поддерживать необходимую эффективность функционирования ССОИ путем контроля ее технического состояния, оперативного диагностирования и устранения отказов, пополнения комплектов запасных элементов и других операций; во-вторых, осуществлять ее модернизацию, в тех случаях, когда наступает неустраняемое обычными управляющими воздействиями снижение эффективности информационного обеспечения [3, 4]. Очевидно, что в описанной ситуации необходимо оценить остаточный срок службы ССОИ до наступления момента времени, когда эффективность информационного обеспечения станет недостаточной для качественного решения задач управления космическими средствами.

Если задать некоторое минимальное значение показателя эффективности информационного обеспечения  $W_{\min}$ , можно ввести понятие *предельного состояния ССОИ по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения* (когда дальнейшая эксплуатация ССОИ нецелесообразна). При этом устойчивое прогрессирующее снижение фактического полезного эффекта от функционирования ССОИ, обусловленное ростом стоимости „информационного ущерба“ из-за простоев в работе, вызванных затратами времени на поиск и устранение отказов оборудования ССОИ, может трактоваться как *моральное устаревание ССОИ по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения*.

Целесообразно также ввести понятие *проектного срока службы до морального устаревания ССОИ* как интервала времени от начала эксплуатации ССОИ до момента достижения предельного состояния по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения. Под *остаточным сроком морального устаревания ССОИ по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения*  $T_{\min}(\tau)$  будем понимать временной интервал от текущего момента времени  $\tau$  до момента достижения предельного состояния по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения  $T_{\min}$ .

**Постановка и решение задачи прогнозирования проектного и остаточного срока морального устаревания ССОИ.** Рассмотрим функционирование ССОИ на некотором интервале времени  $T = [0, t]$ . Количество информации, поступающей от ССОИ к управляющему объекту в единицу времени, обозначим как  $\nu_I$  [Мб/ч] и назовем *информационной производительностью* ССОИ. Если обозначить  $c_I$  [руб./Мб] как *монетизированную ценность единицы информации* для управления конкретным объектом, то произведение  $c_I \nu_I$  [руб./ч] есть *производительность* ССОИ.

Тогда максимально достижимая (без вынужденных перерывов функционирования) ценность информации  $C_{I_{\max}}(t)$  [руб.], получаемой от ССОИ на интервале  $T = [0, t]$ , составит:

$$C_{I_{\max}}(t) = c_I \nu_I t. \quad (1)$$

Если учесть, что для обеспечения функционирования ССОИ необходимо вложить определенные затраты  $S_c$  в создание ССОИ и ее эксплуатацию  $S_s(t)$  на интервале  $T = [0, t]$ , то фактическая ценность  $C_{I_{\text{ф}}}(t)$  от функционирования ССОИ на интервале  $T = [0, t]$  уменьшится на величину, равную сумме затрат на разработку и эксплуатацию. Кроме того, из макси-

мально достижимой ценности информации  $C_{I_{\max}}(t)$  необходимо дополнительно вычесть стоимость ущерба  $S_y(t)$  из-за простоев в работе, вызванных затратами времени на поиск и устранение отказов оборудования ССОИ [5]:

$$C_{I\phi}(t) = C_{I_{\max}}(t) - S_c - S_3(t) - S_y(t). \quad (2)$$

Введем *показатель эффективности информационного обеспечения процесса управления объектами космических комплексов* как отношение фактического полезного эффекта (2) от функционирования ССОИ на интервале  $T = [0, t]$  к максимально достижимой ценности информации, которая в идеале могла бы быть получена от ССОИ на данном интервале:

$$W(t) = C_{I\phi}(t) / C_{I_{\max}}(t). \quad (3)$$

Затраты на создание ССОИ могут быть представлены в виде:

$$S_c(P) = S_{c.o} + S_{c.d}(P), \quad (4)$$

где  $S_{c.o}$  [руб.] — основные расходы (на проектирование, создание опытных образцов и макетов, разработку программного обеспечения, закупку комплектующих, сборку, наладку, испытания, ввод в эксплуатацию и т.п.);  $S_{c.d}(P)$  [руб.] — дополнительные расходы, связанные с обеспечением на стадии создания заданного уровня надежности ССОИ, равного  $P=P(t_3)$  (на проведение исследований по обоснованию выбора элементной базы, создание испытательных стендов для составных частей ССОИ, проведение входного и выходного контроля комплектующих и составных изделий, испытания для подтверждения требуемого уровня надежности и т.п.),  $P$  — достижимый уровень вероятности безотказной работы ССОИ на интервале  $[0, t_3]$ .

Затраты  $S_{э.д}(P)$  на эксплуатацию ССОИ аналогично (4) также можно подразделить на две составляющие:

$$S_э(P) = S_{э.o} + S_{э.д}(P), \quad (5)$$

где  $S_{э.o}$  [руб.] — основные расходы на эксплуатацию ССОИ (на аренду помещений, каналов связи, зарплату персонала, обучение персонала, закупку расходных материалов и комплектующих и т.п.);  $S_{э.д}(P)$  [руб.] — дополнительные расходы, связанные с поддержанием работоспособности ССОИ на этапе эксплуатации при уровне ее безотказности, равном  $P$  (на проведение технического обслуживания и ремонта, контрольно-диагностических, профилактических работ, восполнение комплектов запасных элементов и т.п.).

Предположим, что зависимость составляющей расходов  $S_{c.d}(P)$  может быть описана формулой вида [6]:

$$S_{c.d}(P) = S_{c0.d} \left( \frac{1-P_0}{1-P} \right)^\alpha, \quad (6)$$

где  $S_{c0.d}$  [руб.] — дополнительные расходы на стадии создания, связанные с обеспечением достигнутого в отрасли уровня безотказности, равного  $P_0=P_0(t_3)$ , для аналогичных по функциональному назначению образцов ССОИ;  $\alpha$  — коэффициент, определяемый на основе статистических данных для конкретной технологии создания ССОИ. Отношение  $\frac{1-P_0}{1-P} \geq 1$  характеризует меру прогресса при совершенствовании надежности ССОИ.

Введем допущение, что дополнительные эксплуатационные расходы  $S_{э.д}(P)$ , связанные с затратами на поддержание работоспособности ССОИ на этапе эксплуатации при уровне ее безотказности  $P$ , можно оценить как:

$$S_{н.д}(P) = S_{э.ид.д}(1-P), \quad (7)$$

где  $S_{э.ид.д}$  — стоимость эксплуатации идеально надежной системы, т.е. расходы  $S_{н.д}(P)$  тем больше, чем ниже фактическая безотказность системы, так как в этом случае неизбежно увеличиваются затраты на дополнительные мероприятия по предотвращению отказов и минимизации их последствий.

Обозначим суммарные затраты на создание и эксплуатацию ССОИ как

$$S_3(P) = S_c(P) + S_3(P). \quad (8)$$

Подставив (4)—(7) в (8), получим:

$$S_3(P) = S_{с.о} + S_{с0.д} \left( \frac{1-P_0}{1-P} \right)^\alpha + S_{э.о} + S_{э.ид.д}(1-P). \quad (9)$$

Рассмотрим более подробно зависимость  $S_y(t)$  стоимости ущерба из-за простоев в работе, вызванных затратами времени на поиск и устранение отказов оборудования ССОИ. Очевидно, что величина простоев зависит от двух факторов, а именно — уровня безотказности  $P$ , определяющего величину интенсивности отказов  $\lambda(t)$  ССОИ, и среднего времени восстановления работоспособного состояния при отказах  $T_B$ , задающего величину интенсивности восстановления работоспособности ССОИ  $\mu(t)$ . Тогда можно записать

$$S_y[P, T_B, t] = C_{I \max}(t) K_{пр}, \quad (10)$$

где  $K_{пр}$  — коэффициент простоя ССОИ, определяющий долю интервала  $T = [0, t]$ , в течение которой ССОИ не функционирует по назначению, так как в это время выполняются мероприятия по поиску и устранению отказов ССОИ.

Известно, что значение коэффициента простоя может быть рассчитано на основе оценок постоянных значений интенсивности отказов  $\lambda$  и интенсивности восстановления работоспособности ССОИ  $\mu$  как [4]:

$$K_{пр} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \quad (11)$$

Для стационарной  $\lambda$  известна зависимость  $P = \exp[-\lambda t_3]$ , откуда

$$\lambda = -\frac{\ln P}{t_3}. \quad (12)$$

Величина  $\mu$  связана с  $T_B$  обратной зависимостью

$$\mu = 1/T_B. \quad (13)$$

Подставив (1), (11)—(13) в (10), получим

$$S_y[P, T_B, t_3] = c_I v_I t_3 \frac{T_B \ln P}{T_B \ln P - t_3}. \quad (14)$$

Теперь выражение (3) с учетом (1), (2), (10) и (14) можно записать как

$$W[P, T_B, t_3] = \frac{c_I v_I t_3 - c_I v_I t_3 \frac{T_B \ln P}{T_B \ln P - t_3}}{c_I v_I t_3} - \frac{S_{с.о} + S_{э.о}}{c_I v_I t_3} - \frac{S_{с0.д} \left( \frac{1-P_0}{1-P} \right)^\alpha}{c_I v_I t_3} - \frac{S_{э.ид.д}(1-P)}{c_I v_I t_3} = 1 - \frac{T_B \ln P}{T_B \ln P - t_3} - \frac{S_{с.о} + S_{э.о}}{c_I v_I t_3} - \frac{S_{с0.д} \left( \frac{1-P_0}{1-P} \right)^\alpha}{c_I v_I t_3} - \frac{S_{э.ид.д}(1-P)}{c_I v_I t_3}. \quad (15)$$

Для того чтобы определить конкретные числовые значения оптимального уровня безотказности ССОИ  $P^* = P^*(t_3, T_B)$  по критерию максимума показателя эффективности информа-

ционного обеспечения (15), необходимо найти частную производную выражения  $W[P, T_B, t_3]$  по  $P$  и, приравняв ее нулю, решить полученное уравнение относительно  $P$ .

Производная от функции (15) по  $P$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial W[P, T_B, t_3]}{\partial P} = \frac{t_3}{PT_B \left( \ln P - \frac{t_3}{T_B} \right)^2} - \frac{S_{с0,д} (1 - P_0)^\alpha}{c_1 v_1 t_3} \frac{\alpha}{(1 - P_0)^{\alpha+1}} + \frac{S_{э,ид,д}}{c_1 v_1 t_3}. \quad (16)$$

Графики зависимости производной  $\frac{\partial W[P, T_B, t_3]}{\partial P} = \partial W / \partial P$  от  $P$  при различных значениях среднего времени восстановления работоспособности  $T_B$  (1 — 2,4, 2 — 24, 3 — 240, 4 — 2400, 5 — 24 000 ч) приведены на рис. 2. Точки пересечения кривых с осью абсцисс соответствуют оптимальным значениям вероятности безотказной работы  $P$ .

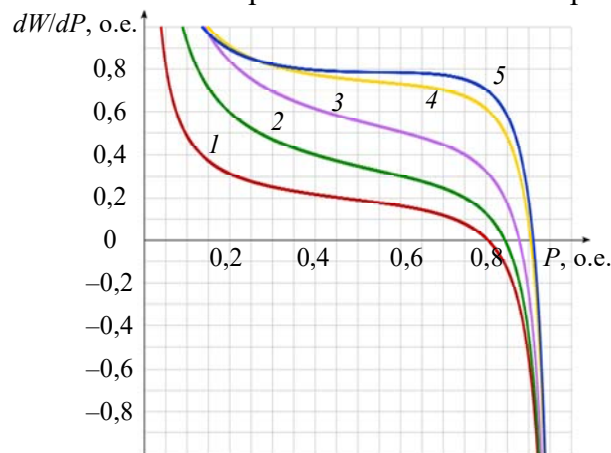


Рис. 2

Допустим, что в процессе создания ССОИ были достигнуты:

а) некоторое начальное значение среднего времени восстановления работоспособного состояния  $T_B^*$ ;

б) условно оптимальное значение безотказности ССОИ  $P^* = P^*(t_3^*, T_B^*)$  на некотором заданном интервале времени  $t_3^*$ , определенное с помощью зависимостей, приведенных на рис. 2, при условии, что среднее время восстановления работоспособного состояния равно  $T_B^*$ .

Если бы в дальнейшем эти параметры функции  $W$  оставались неизменными, можно было бы оценить для любого заданного времени эксплуатации  $t_3$  величину показателя эффективности информационного обеспечения  $W[P^*, T_B^*, t_3]$ .

Такие расчеты вполне допустимы для так называемого нормального периода эксплуатации ССОИ [6], в течение которого неизменны интенсивность отказа ССОИ  $\lambda^*$ , определяемая на основе (12) как

$$\lambda^* = -\frac{\ln P^*}{t_3^*}, \quad (17)$$

а также интенсивность восстановления работоспособного состояния ССОИ  $\mu^*$ , определяемая на основе (13) как

$$\mu^* = 1 / T_B^*. \quad (18)$$

Однако при эксплуатации ССОИ начинают формироваться и развиваться два процесса нарушения условия неизменности:

— (начало роста) интенсивности отказов ССОИ  $\lambda^*$  из-за накопления возрастных дефектов и отклонений в элементах оборудования ССОИ, при наличии которых интенсивность отказа начинает с течением времени возрастать;

— (начало снижения) интенсивности восстановления работоспособного состояния ССОИ  $\mu^*$  из-за морального устаревания элементной базы оборудования, приводящего к снятию ее с производства, а значит — к нарушению стабильности процесса восполнения комплектов запасных элементов, увеличению времени поиска запасных элементов, возрастанию возможности возникновения неустраняемых отказов ССОИ.

В этих условиях изменение во времени параметров интенсивности отказа и восстановления можно в первом приближении описать линейными функциями:

$$\lambda(t) = \lambda^* + k_\lambda t = k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}, \quad (19)$$

$$\mu(t) = \mu^* - k_\mu t = \frac{1}{T_B^*} - k_\mu t, \quad (20)$$

где  $k_\lambda, k_\mu$  — коэффициенты скорости изменения интенсивностей отказа и восстановления.

Подставив (19) и (20) в (11), получим выражение для описания изменения во времени коэффициента простоя

$$K_{\text{пр}}(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t) + \mu(t)} = \frac{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}}{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*} + \frac{1}{T_B^*} - k_\mu t}. \quad (21)$$

Вероятность безотказной работы при возрастающей во времени интенсивности отказа ССОИ по закону (19) определяется как

$$P(t) = e^{-\lambda(t)t} = e^{-\lambda(t)} = e^{\lambda^*(t)}, \quad (22)$$

где  $\lambda(t) = -\left(k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}\right)t$ ,  $\lambda^*(t) = \frac{\ln P^*}{t_3^*}t - k_\lambda t^2$ .

Подставив (21) и (22) в (15), получим выражение, позволяющее описать изменения во времени показателя эффективности информационного обеспечения с учетом возрастания интенсивности отказа и уменьшения интенсивности восстановления

$$W(t, k_\lambda, k_\mu) = 1 - \frac{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}}{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*} + \frac{1}{T_B^*} - k_\mu t} - \frac{S_{c.o} + S_{\varepsilon.o}}{c_I v_I t} - \frac{S_{c.o.d}}{c_I v_I t} \left(\frac{1 - P_0^*}{1 - P^*}\right)^\alpha - \frac{S_{\varepsilon.ид.д}}{c_I v_I t} (1 - e^{\lambda(t)}). \quad (23)$$

Выражение (21) можно переписать несколько иначе

$$K_{\text{пр}}(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t) + \frac{1}{T_B(t)}} = \frac{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}}{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*} + \frac{1}{T_B^* + k_{T_B} t}}, \quad (24)$$

где  $k_{T_B}$  — коэффициент скорости изменения среднего времени восстановления.

Тогда выражение (23) с учетом (24) приобретает вид

$$W(t, k_\lambda, k_{T_B}) = 1 - \frac{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*}}{k_\lambda t - \frac{\ln P^*}{t_3^*} + \frac{1}{T_B^* + k_{T_B} t}} - \frac{S_{c.o} + S_{\Delta.o}}{c_I v_I t} - \frac{S_{c0.d}}{c_I v_I t} \left( \frac{1 - P_0^*}{1 - P^*} \right)^\alpha - \frac{S_{\Delta.ид.д}}{c_I v_I t} (1 - e^{\lambda^*(t)}). \quad (25)$$

Основные этапы прогнозирования остаточного срока морального устаревания ССОИ по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения представлены на рис. 3. Способ прогнозирования остаточного срока морального устаревания ССОИ по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения поясняет рис. 4, на котором представлена зависимость показателя  $W(t, k_\lambda, k_{T_B})$  от времени при  $k_\lambda = 5 \cdot 10^{-6}$ ,  $k_{T_B} = 3 \cdot 10^{-4}$ ,  $\lambda^* = 2,3 \cdot 10^{-4}$ ,  $T_B^* = 2,4$  и  $W_{\min} = 0,6$ .

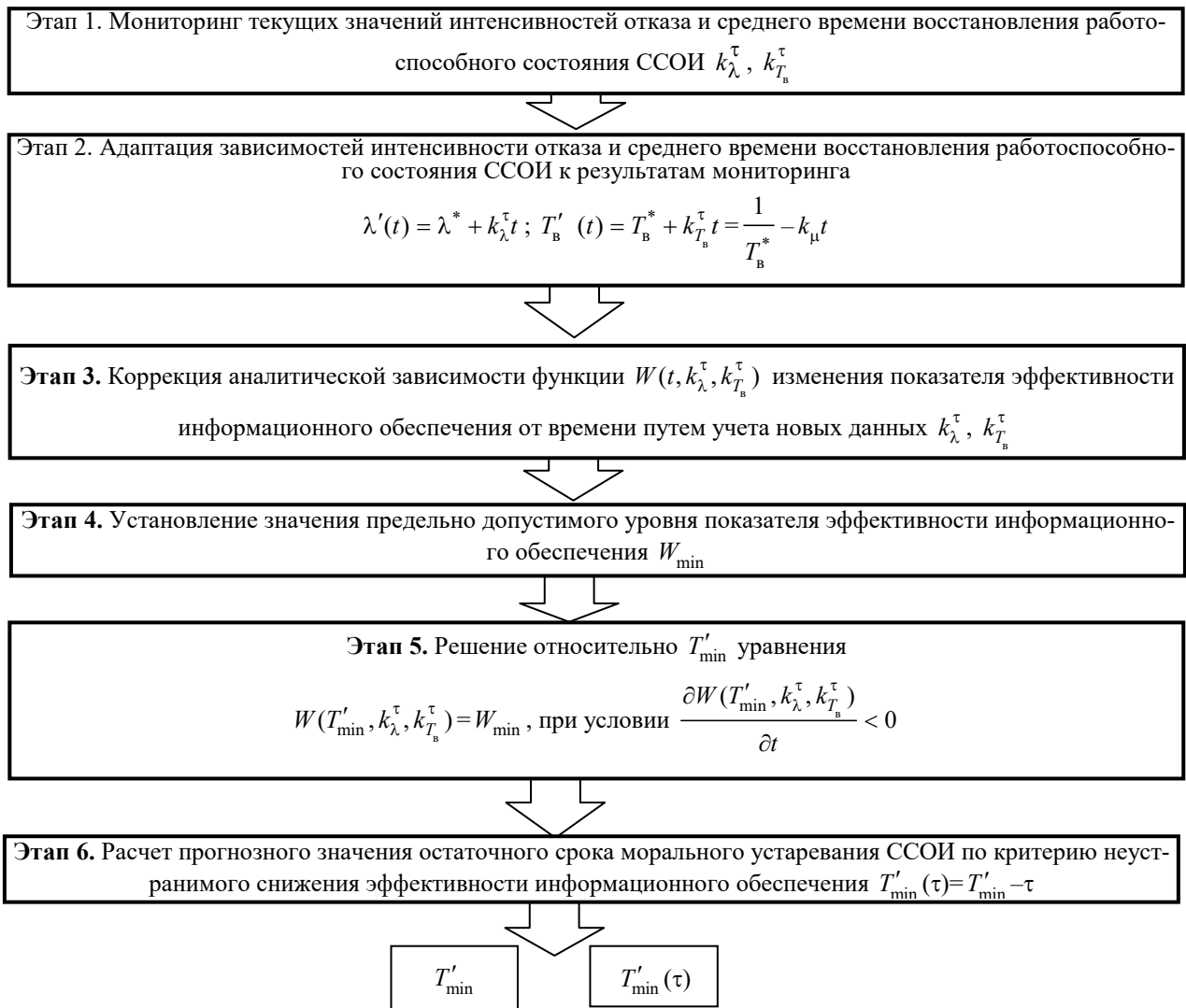


Рис. 3

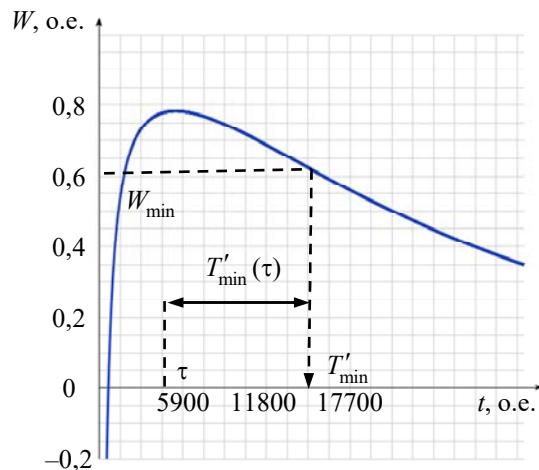


Рис. 4

**Заключение.** Описан подход к прогнозированию остаточного срока морального устаревания систем сбора и обработки информации в космических комплексах по критерию недопустимого снижения эффективности информационного обеспечения в процессе длительной эксплуатации. Приведены основные понятия и математические выражения, необходимые для оценивания проектного и остаточного срока морального устаревания систем сбора и обработки информации. Разработанная и представленная в статье модель позволяет учесть при прогнозировании предельного срока службы систем сбора и обработки информации снижение эффективности информационного обеспечения из-за простоев. Получение прогнозных оценок остаточного срока морального устаревания дает возможность своевременно обосновать потребность в модернизации оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестопалова О. Л. Основы построения систем сбора и обработки информации о техническом состоянии космических средств. Набережные Челны: Изд-во Камской госуд. инж.-экон. акад., 2007. 92 с.
2. Зеленцов В. А., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Хименко В. И. Интеграция информационно-телекоммуникационных ресурсов глобальных систем мониторинга на базе единой интеллектуальной платформы // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1(56). С. 12—15.
3. Дорохов А. Н., Миронов А. Н., Шестопалова О. Л. Определение потребности в модернизации средств технического обеспечения распределенной системы сбора и обработки информации // Информация и космос. 2014. № 1. С. 9—12.
4. Шестопалова О. Л. Прогнозирование моральной долговечности распределенных информационных систем с учетом прогрессирующих ограничений на возможности восстановления ресурса элементной базы // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6 [Электронный ресурс]: <<http://www.science-education.ru/113-11078>>.
5. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
6. Дорохов А. Н., Керножицкий В. А., Миронов А. Н., Шестопалова О. Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. СПб: Лань, 2017. 352 с.

## Сведения об авторе

Ольга Львовна Шестопалова — канд. техн. наук, доцент; Московский авиационный институт, филиал „Восход“, кафедра вычислительных систем и технологий;  
E-mail: neman2004@mail.ru

Поступила в редакцию  
02.10.2020 г.



**Ссылка для цитирования:** Шестопалова О. Л. Прогнозирование морального устаревания систем сбора и обработки информации космических комплексов по критерию эффективности информационного обеспечения // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 2. С. 81—89.

**FORECASTING OBSOLESCENCE OF INFORMATION COLLECTION  
AND PROCESSING SYSTEMS OF SPACE COMPLEXES ACCORDING TO THE CRITERION  
OF INFORMATION SUPPORT EFFICIENCY**

**O. L. Shestopalova**

*Moscow Aviation Institute, Voskhod branch,  
468320, Baikonur, Kazakhstan  
E-mail: neman2004@mail.ru*

The issues of forecasting obsolescence of information collection and processing systems in space complexes are considered. The features of predicting the indicators of design and residual obsolescence terms are described based on presented model of a decrease in the efficiency of information support in time under conditions of increasing equipment downtime caused by progressive failures of the outdated element base.

**Keywords:** information collection and processing system, information support, efficiency of information support, obsolescence

**REFERENCES**

1. Shestopalova O.L. *Osnovy postroyeniya sistem sbora i obrabotki informatsii o tekhnicheskoy sostoyanii kosmicheskikh sredstv* (Fundamentals of Building Systems for Collecting and Processing Information on the Technical State of Space Vehicles), Naberezhnyye Chelny, 2007, 92 p. (in Russ.)
2. Zelentsov V.A., Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Khimenko V.I. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy*, 2012, no. 1(56), pp. 12–15. (in Russ.)
3. Dorokhov A.N., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Information and Space*, 2014, no. 1, pp. 9–12. (in Russ.)
4. <http://www.science-education.ru/113-11078>. (in Russ.)
5. Pronikov A.S. *Nadezhnost' mashin* (Reliability of machines), Moscow, 1978, 592 p. (in Russ.)
6. Dorokhov A.N., Kernozhitskiy V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespecheniye nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Ensuring the Reliability of Complex Technical Systems), St. Petersburg, 2017, 352 p. (in Russ.)

**Data on author**

**Olga L. Shestopalova**

— PhD, Associate Professor; Moscow Aviation Institute, Voskhod Branch, Department of Computer Systems and Technologies;  
E-mail: neman2004@mail.ru

**For citation:** Shestopalova O. L. Forecasting obsolescence of information collection and processing systems of space complexes according to the criterion of information support efficiency. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 2. P. 81—89 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-2-81-89