

Повышение живучести агрегатов ракетно-космических систем в условиях теплового нагружения

© А.А. Золотов, Э.Д. Нуруллаев

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

Рассмотрен метод прогнозирования надежности и повышения живучести ракетно-космических систем при возникновении нештатных ситуаций и частичных отказов обеспечивающих устройств. Показано, что использование стратегии чередования активного и пассивного режимов работы позволяет существенно увеличить среднее время безотказного функционирования. Оптимизирована периодичность переключения между активным и пассивным режимами работы. Определены области целесообразного применения циклического режима работы в зависимости от надежности переключателя. Эффективность использования методики проиллюстрирована на модельном примере. Полученные результаты могут служить руководством для инженеров при решении задач обеспечения надежности и живучести ракетно-космических систем в процессе разработки и реализации целевых космических программ.

Ключевые слова: надежность, живучесть, граф состояний, интенсивность отказа, циклический режим, тепловое нагружение

Введение. Активное развитие ракетно-космической техники (РКТ) характеризуется появлением большого числа сложного оборудования, предназначенного для решения различных технических задач. Их многообразие приводит к необходимости совершенствования подходов по обеспечению высоких уровней надежности РКТ. При анализе надежности ракетно-космических систем (РКС) следует учитывать, что в процессе эксплуатации возникают нештатные ситуации, обусловленные отказами отдельных бортовых систем и агрегатов. В связи с этим возникает проблема поддержания работоспособности РКС в случае отказов таких устройств за счет введения различного рода избыточности и оптимизации режимов работы. Опираясь на опыт разработки РКС, можно сформулировать ряд общих принципов, соблюдение которых гарантирует высокий уровень надежности [1]:

- использование схем с ограниченными последствиями отказов;
- применение стандартизированных и унифицированных элементов;
- введение функционального, структурного, параметрического резервирования;
- снижение интенсивности отказа;
- сокращение времени непрерывной работы;

- сокращение среднего времени восстановления;
- проведение технического обслуживания.

При введении резервных элементов существенно повышается надежность РКС, но увеличиваются масса, габариты, энергопотребление, стоимость, а также усложняются условия эксплуатации (возрастает частота контрольных проверок, увеличивается количество запасных инструментов и принадлежностей и т. д.).

Снижение интенсивности отказа РКС может быть обеспечено уменьшением числа элементов. Но при этом происходит упрощение РКС, и в большинстве случаев становится невозможным обеспечить выполнение предъявляемых требований.

Повышением уровня параметрической избыточности также можно достичь снижения интенсивности отказа РКС. Однако в этом случае повышается стоимость РКС и возникает необходимость оптимизации уровня структурного и параметрического резервирования РКС по критерию материальных затрат.

Сокращение среднего времени восстановления позволяет увеличить коэффициент готовности, следовательно, повысить эффективность работы РКС. Но при этом могут возрасти материальные затраты на эксплуатацию.

Проведение технического обслуживания при эксплуатации РКС обеспечивает своевременное предупреждение отказов путем устранения выявляемых неисправностей. Однако это также может привести к увеличению материальных затрат на эксплуатацию.

Сокращение времени непрерывной работы достигается многократным включением и выключением, что позволяет разумно использовать ресурс РКС. Однако надо избегать частых включений и выключений, которые могут негативно сказаться на работоспособности.

Очевидно, что надежность РКС зависит не только от качества, но и от условий эксплуатации, т. е. надежность РКС существенно зависит от уровня воздействия таких внешних факторов, как температура, влажность, механические нагрузки, агрессивные среды, электрические и магнитные поля и др.

Цель настоящего исследования — научно обосновать сокращение времени непрерывной работы РКС как принципа обеспечения высокого уровня надежности и живучести в условиях возникновения частичных отказов обеспечивающих устройств. В этой связи рассмотрены следующие вопросы:

- оценка надежности и живучести РКС при чередовании активного и пассивного режимов работы;
- продление ресурса РКС путем чередования активного и пассивного режимов работы;
- зависимость циклического режима работы и уровня надежности переключателя.

Анализ способов обеспечения надежности и живучести ракетно-космических систем с учетом условий работы. Важнейший фактор, существенно влияющий на надежность РКС, — тепловой режим работы.

Актуальность проблематики подтверждается, в частности, зависимостями интенсивности отказа от рабочей температуры и характера нагружения комплектующих элементов.

Рассмотрим зависимость интенсивности отказа транзисторов от рабочей температуры для разных уровней коэффициента нагрузки. Характер зависимости интенсивности отказа транзисторов от рабочей температуры и характера нагружения описывается соотношением [2]

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \exp \left[B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right],$$

где $T_0 = 273 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения коэффициентов B и $\lambda_0(T_0)$ при различных нагрузках приведены в таблице [3].

Значения коэффициентов B и $\lambda_0(T_0)$ при разных коэффициентах нагрузки K_n

Коэффициент	K_n				
	1	0,75	0,5	0,25	0
Для германиевых транзисторов					
B	2500	2930	4330	6360	13300
$\lambda_0 \cdot 10^5 \text{ 1/ч}$	2	1	0,5	0,15	0,001
Для кремниевых транзисторов					
B	3100	3200	4000	4670	6020
$\lambda_0 \cdot 10^5 \text{ 1/ч}$	0,9	0,56	0,34	0,18	0,05

Зависимости для германиевых (Г) и кремниевых (К) транзисторов приведены на рис. 1.

Для обеспечения безотказной работы необходимо поддерживать требуемый температурный режим. Отказ системы обеспечения теплового режима (СОТР) в итоге может привести к быстрому отказу РКС. В связи с этим практический интерес представляет собой проблема повышения живучести агрегатов РКС в условиях отказа СОТР.

Метод прогнозирования надежности и повышения живучести ракетно-космических систем с учетом циклического режима работы. Для исследования работоспособности РКС в нестандартных ситуациях целесообразно использовать метод графов [4]. В общем случае характер протекания процесса можно представить в виде графа (рис. 2).

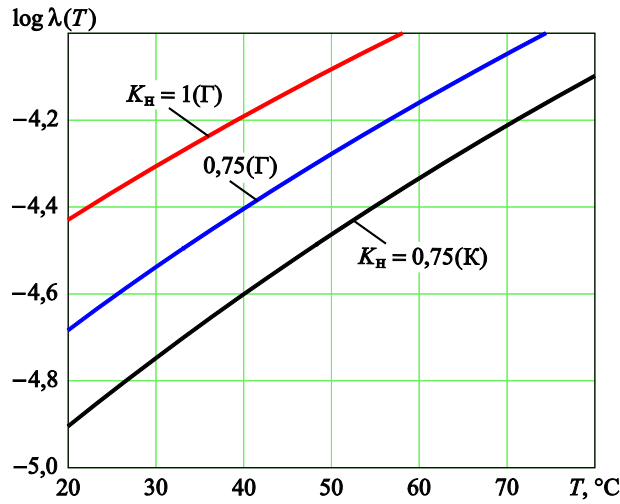


Рис. 1. Зависимость логарифма интенсивности отказа $\log [\lambda (T)]$ для германиевых (Г) и кремниевых (К) транзисторов от рабочей температуры и характера нагружения

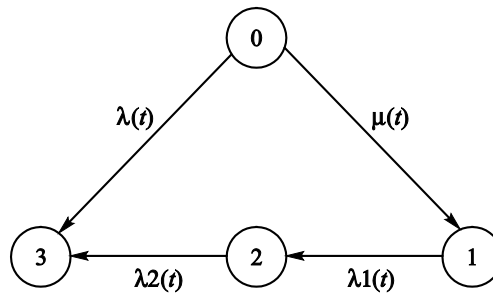


Рис. 2. Граф состояний системы

На графе (см. рис. 2) показаны четыре состояния РКС:

0 — РКС и СОТР исправны;

1 — отказ СОТР;

2 — отказ основного элемента РКС;

3 — отказ основного и резервного элементов РКС.

В данном случае безотказной работе РКС соответствуют состояния 0, 1, 2.

Следовательно, надежность РКС

$$H(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t),$$

где $P_0(t)$ — вероятность нахождения в состоянии 0; $P_1(t)$ — вероятность нахождения в состоянии 1; $P_2(t)$ — вероятность нахождения в состоянии 2.

Тогда вероятность отказа РКС

$$P_3(t) = 1 - H(t).$$

В случае когда интенсивности перехода между состояниями $\lambda(t)$, $\mu(t)$, $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ зависят от времени t , будем иметь неоднородный марковский процесс. В этом случае протекание процесса можно описать системой дифференциальных уравнений Колмогорова:

$$P_0'(t) = -[\lambda(t) + \mu(t)]P_0(t),$$

$$P_1'(t) = \mu(t)P_0(t) - \lambda_1(t)P_1(t),$$

$$P_2'(t) = \lambda_1(t)P_1(t) - \lambda_2(t)P_2(t).$$

После интегрирования получим [5]

$$P_0(t) = \exp\left[-\int_0^t [\lambda(\tau) + \mu(\tau)] d\tau\right],$$

$$P_1(t) = [V(t)]^{-1} \left[\int_0^t \mu(\tau) P_0(\tau) V(\tau) d\tau \right],$$

$$P_2(t) = [W(t)]^{-1} \left[\int_0^t \lambda_1(\tau) P_1(\tau) W(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где $V(t) = \exp\left[\int_0^t \lambda_1(x) dx\right]$, $W(t) = \exp\left[\int_0^t \lambda_2(x) dx\right]$.

В дальнейшем заметим, что если интенсивности отказа основного $\lambda_1(t, \tau_1)$ и резервного $\lambda_2(t, \tau_2)$ элементов будут зависеть от моментов отказа τ_1 и τ_2 , то процесс нельзя считать марковским, так как в этом случае вероятности перехода между состояниями будут зависеть от предыстории работы РКС. В частности, для закона распределения Вейбулла интенсивность отказа элемента после отказа СОТР можно представить в таком виде [6]: $\lambda_1(t, \tau_1) = \lambda_0 v(t - \tau_1)^{v-1}$. Чтобы процесс считать марковским, аппроксимируем интенсивности отказа элементов $\lambda_1(t, \tau_1)$ и $\lambda_2(t, \tau_2)$ на отрезке $(0, \tau_0)$ постоянными значениями λ_{1cp} и λ_{2cp} , обеспечивающими ту же вероятность отказа, что и закон распределения Вейбулла.

В дальнейшем рассмотрим оценки λ_{1cp} и λ_{2cp} для двух схем работы РКС в случае отказа СОТР: первая схема — с использованием резервного элемента, вторая схема — с зонами простоя.

По первой схеме работы РКС предполагается, что после отказа СОТР происходит чередование работы основного и резервного элементов с периодичностью τ_0 (рис. 3).

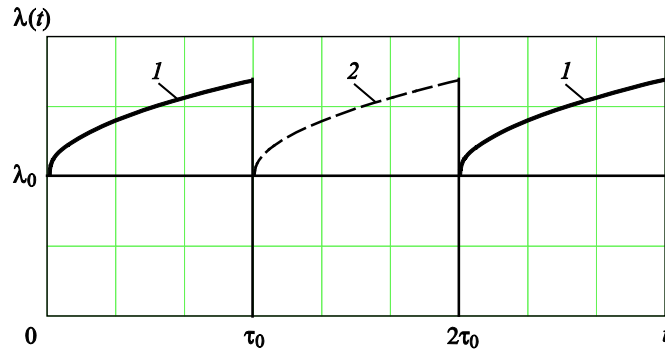


Рис. 3. Изменение интенсивности отказа РКС при работе основного (1) и резервного (2) элементов в циклическом режиме

С увеличением интенсивности отказа РКС, как видно из данных на рис. 3, при воздействии внешних факторов, в частности при повышении температуры, с периодичностью τ_0 происходит переключение на резервный элемент. В дальнейшем предполагается, что за время τ_0 при отсутствии воздействия внешних факторов интенсивность отказа основного элемента снижается до номинального значения λ_0 .

При решении задачи примем, что в процессе работы РКС на интервале τ_0 интенсивность отказа изменяется согласно зависимости

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \lambda v t^{v-1},$$

где λ и v — соответственно параметры масштаба и формы закона распределения Вейбулла.

Интенсивность отказа элемента в отключенном режиме примем равной нулю. В этом случае, приравнивая вероятности безотказной работы, получим $\exp[-(\lambda\tau_0 + \lambda_0\tau_0^v)] = \exp[-\lambda l_{cp} \tau_0]$, откуда $\lambda l_{cp}(\tau_0) = \lambda + \lambda_0\tau_0^{v-1}$.

Таким образом, по первой схеме работы РКС средняя интенсивность отказа будет

$$\lambda l_{cp}(\tau_0) = \lambda + \lambda_0\tau_0^{v-1} + \frac{2\beta}{\tau_0},$$

где $\beta = \ln \frac{1}{H_{пер}}$, $H_{пер}$ — надежность переключателя.

По второй схеме работы РКС предполагается, что после отказа основного элемента происходит включение резервного элемента с периодичностью $\tau_{пр}$ (рис. 4).

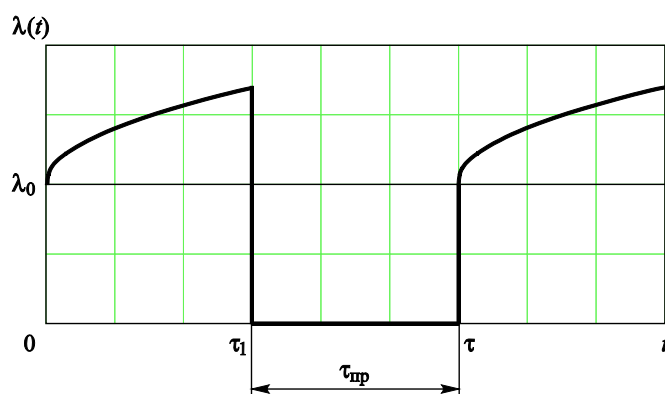


Рис. 4. Схема работы РКС с зоной простоя

Очевидно, в общем случае время простоя $\tau_{пр}$ будет зависеть от времени работы τ_1 элемента: $\tau_{пр} = \alpha\tau_1$, отсюда $\tau = \tau_1 + \alpha\tau_1$.

Приравнивая вероятности безотказной работы, получим

$$\exp[-(\lambda\tau_1 + \lambda_0\tau_1^v + 2\beta)] = \exp[-\lambda 2_{ср}(\tau_1 + \alpha\tau_1)].$$

Таким образом, по второй схеме работы РКС средняя интенсивность отказа будет

$$\lambda 2_{ср}(\tau_1) = \frac{\lambda\tau_1 + \lambda_0\tau_1^v + 2\beta}{\tau_1 + \alpha\tau_1}.$$

Тогда средняя интенсивность отказа по второй схеме работы РКС будет меньше, чем по первой, однако ввиду наличия зон простоя снизится эффективность работы РКС.

Результаты параметрического анализа ресурса ракетно-космических систем с учетом циклического режима работы. Работоспособность предлагаемого подхода проиллюстрируем на модельном примере. При проведении расчетов интенсивности отказов λ , μ , $\lambda 1_{ср}$, $\lambda 2_{ср}$ примем не зависящими от времени t , т. е. рассмотрим однородный марковский процесс.

Следует заметить, что для этого процесса время перехода $L_{i,j}$ из состояния i в состояние j можно оценить по соотношению [7]:

$$L_{i,j} = m_i + \sum_{k \neq j} p_{i,k} L_{k,j}, \quad (2)$$

где $m_i = \frac{1}{\sum_j \lambda_{i,j}}$ — математическое ожидание времени пребывания

в состоянии i ; $p_{i,k} = \frac{\lambda_{i,k}}{\sum_j \lambda_{i,j}}$ — вероятность перехода из состояния i

в состояние j .

Использование соотношения (2) позволяет получить оценку среднего времени работы РКС $T(\tau_0, \tau_1)$:

$$T(\tau_0, \tau_1) = L_{0,3}(\tau_0, \tau_1) = L_{0,2}(\tau_0) + L_{2,3}(\tau_1),$$

где $L_{0,2}(\tau_0) = \frac{1}{\lambda + \mu} \left\{ 1 + \mu [\lambda 1_{\text{ср}}(\tau_0)]^{-1} \right\}$, $L_{2,3}(\tau_1) = [\lambda 2_{\text{ср}}(\tau_1)]^{-1}$.

Оптимальные периодичности переключений (τ_0, τ_1) удовлетворяют условиям [8]: $\frac{d}{d\tau_0} [T(\tau_0, \tau_1)] = 0$, $\frac{d}{d\tau_1} [T(\tau_0, \tau_1)] = 0$.

После преобразований получим:

$$\frac{d}{d\tau_0} [T(\tau_0, \tau_1)] = \frac{d}{d\tau_0} [L_{0,2}(\tau_0)] = \left[\frac{1}{\lambda + \lambda_0 \tau_0^{v-1} + \frac{2\beta}{\tau_0}} \right]'_{\tau_0} = 0,$$

$$\frac{d}{d\tau_1} [T(\tau_0, \tau_1)] = \frac{d}{d\tau_1} [L_{2,3}(\tau_1)] = \left[\frac{1}{\lambda + \lambda_0 \tau_1^{v-1} + \frac{2\beta}{\tau_1}} \right]'_{\tau_1} = 0.$$

Таким образом, оптимальная периодичность переключений, обеспечивающая максимум $L_{0,2}(\tau_0)$, совпадает с оптимальной периодичностью переключений, обеспечивающей максимум $L_{2,3}(\tau_1)$.

В дальнейшем проанализируем изменение среднего времени работы РКС в зависимости от периодичности переключений τ_0 .

При проведении расчетов были приняты следующие исходные данные: $v = 2,5$; $\lambda = 10^{-3} \frac{1}{\text{мес.}}$; $\lambda_0 = 10^{-3} \frac{1}{\text{мес.}}$; $\mu = 5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{мес.}}$; $\alpha = 0,5$; $\beta = 10^{-2}$.

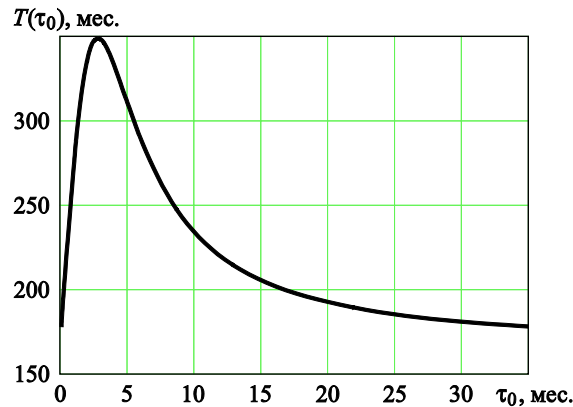


Рис. 5. Зависимость среднего времени работы РКС от периодичности переключений τ_0 для $\beta = 0,01$

Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Как видно из графика (см. рис. 5) максимум $T(\tau_0)$ достигается при $\tau_0 = 2,8$ мес. При этом среднее время работы РКС $T(2,8) = 348,558$ мес. Однако реальное время работы РКС T_p из-за наличия зон простоя сокращается:

$$T_p = T(2,8) - \frac{\alpha}{1+\alpha} L_{2,3}(2,8) = 309,581 \text{ мес.},$$

где $L_{2,3}(\tau_0) = L[\lambda 2_{cp}(\tau_0)]^{-1} = 116,93$ мес.

Полученные результаты позволяют также найти гамма-процентный ресурс РКС t_γ , оцениваемый при $\tau_0 = 2,8$ по соотношениям:

$$F(t_\gamma) = \int_{t_\gamma}^{\infty} f(t) dt,$$

$$F(t1_\gamma) = \int_{t1_\gamma}^{\infty} f1(t) dt,$$

где $f(t) = -\frac{d}{dt} H(t)$, $H(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t)$; t_γ — гамма-процентный ресурс РКС.

В этом случае функции $P_0(t)$, $P(t)$, $P_2(t)$ рассчитывали по соотношениям (1) с учетом чередования активного и пассивного режимов работы:

$$P_0(t) = e^{-(\lambda+\mu)t},$$

$$P_1(t) = \frac{\mu \exp[-\lambda 1_{cp}(\tau_0)t]}{\lambda + \mu - \lambda 1_{cp}(\tau_0)} \left[1 - \exp(-[\lambda + \mu - \lambda 1_{cp}(\tau_0)]t) \right],$$

$$P_2(t) = \exp[-\lambda 2_{cp}t] \lambda 1_{cp}(\tau_0) \int_0^t \exp[\lambda 2_{cp}x] P_1(x) dx.$$

Плотность распределения времени безотказной работы РКС $f(t)$ приведена на рис. 6.

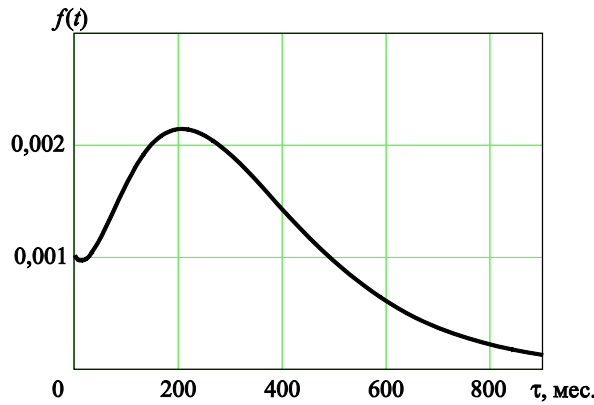


Рис. 6. Плотность распределения времени безотказной работы РКС

Принимая $\gamma = 0,9$, получим $t_\gamma = 86$ мес. При отсутствии переключений среднее время работы РКС [9]:

$$T_2 = \int_0^{\infty} [P_0(t) + P_1(t)] dt,$$

где $P_0(t)$ — вероятность безотказной работы РКС при работе СОТР; $P_1(t)$ — вероятность безотказной работы РКС при отказе СОТР.

В этом случае функции $P_0(t)$, $P_1(t)$ рассчитывали по соотношениям [10]:

$$P_0(t) = \exp[-(\lambda + \mu)t],$$

$$P_1(t) = \int_0^t \mu \exp[-(\lambda + \mu)\tau] \exp\left[-\int_{\tau}^t \lambda(x - \tau) dx\right] d\tau.$$

При проведении расчетов предполагается, что после отказа СОТР подключается резервный элемент. В случае горячего резерва функция надежности элемента $H(t)$:

$$H(t) = 1 - [1 - h(t)]^2,$$

где $h(t) = \exp[-(\lambda t + \lambda_0 t^v)]$.

Отсюда

$$\lambda(t) = -\frac{H'(t)}{H(t)} = -\frac{2[1-h(t)]h'(t)}{H(t)},$$

где $h'(t) = (-1)h(t)(\lambda + v\lambda_0 t^{v-1})$.

Тогда

$$\lambda(t) = \frac{2[1-h(t)]h(t)}{H(t)}(\lambda + v\lambda_0 t^{v-1}) = 2[1+(1-h)^{-1}]^{-1}(\lambda + v\lambda_0 t^{v-1}). \quad (3)$$

С учетом соотношения (3) среднее время безотказной работы РКС

$$T2 = \int_0^{\infty} [P_0(t) + P_1(t)] dt = 180,5,$$

где $P_0(t) = \exp[-(\lambda + \mu)t]$,

$$P_1(t) = \int_0^t \mu e^{-\beta} \exp[-(\lambda + \mu)\tau] \times \\ \times \exp\left(-\int_{\tau}^t \frac{2}{\tau + [1 - \exp[-\lambda(x - \tau) + \lambda_0(x - \tau)^v]]^{-1}} [\lambda + v\lambda_0(x - \tau)^{v-1}] dx\right) d\tau.$$

Полученная оценка $T2 = 180,5$ ниже реального времени работы РКС $T(2,8) = 309,6$ с учетом чередования активного и пассивного режимов работы. Таким образом, введение циклического режима увеличивает реальное время работы на 71,5 %.

В итоге проанализируем зависимость среднего времени безотказной работы РКС от надежности переключателя. Изменение среднего времени безотказной работы РКС по τ_0 при снижении надежности переключателя приведено на рис. 7.

Как видно из графика (см. рис. 7), максимум $T(\tau_0)$ достигается при $\tau_0 = 5,4$. При этом среднее время работы РКС $T(5,4) = 239,431$.

Соответственно реальное время работы РКС T_p сокращается из-за наличия зон простоя:

$$T_p = T(5,4) - \frac{\alpha}{1 + \alpha} L_{2,3}(5,4) = 223,839,$$

где $L_{2,3}(\tau_0) = L[\lambda_{2,3}(\tau_0)]^{-1} = 46,777$.

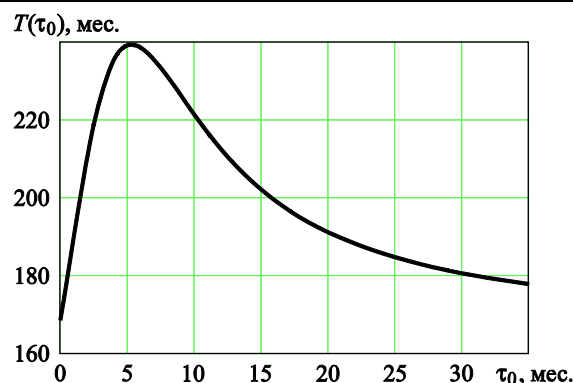


Рис. 7. Зависимость среднего времени работы РКС от периодичности переключений τ_0 для $\beta = 0,05$

Таким образом, как показывают результаты расчетов, с понижением надежности переключателя оптимальная периодичность переключений τ_0 увеличивается, а среднее время работы РКС уменьшается, т. е. эффективность предлагаемого подхода снижается. Очевидно, значение β , при котором среднее время работы РКС при использовании переключений совпадает со средним временем работы РКС при отсутствии переключений, определяет границу целесообразности использования циклического режима.

Заключение. На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) предложена методика оценки надежности и повышения живучести РКС, работающих в циклическом режиме, обусловленном чередованием рабочих элементов, чередованием активных и пассивных режимов работы;
- 2) показана целесообразность использования циклического режима для продления ресурса РКС при высоком уровне надежности переключателя;
- 3) определены области целесообразного использования циклического режима работы в зависимости от уровня надежности переключателя.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 9.9074.2017/БЧ Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Золотов А.А., Оделевский В.К., Родченко В.В., Черников А.И. *Прикладные методы и алгоритмы обеспечения надежности и безопасности технических систем на этапе их разработки и эксплуатации*. Москва, МАИ, 2013, 349 с.
- [2] Волков Л.И. *Управление эксплуатацией летательных комплексов*. Москва, Высшая школа, 1987, 400 с.

- [3] Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Том 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надежности. Москва, Машиностроение, 1990, 336 с.
- [4] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, Наука, 1969, 576 с.
- [5] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Москва, Наука, 1986, 544 с.
- [6] Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Москва, Наука, 1965, 524 с.
- [7] Емелин Н.М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. Москва, Машиностроение, 1995, 128 с.
- [8] Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных технических систем. Санкт-Петербург, Лань, 2011, 352 с.
- [9] Кравченко И.Н., Пучин Е.А., Чепурин А.В. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика. Москва, Альфа-М, 2012, 336 с.
- [10] Васильев Б.В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. Москва, Советское радио, 1970, 334 с.

Статья поступила в редакцию 24.10.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д. Повышение живучести агрегатов ракетно-космических систем в условиях теплового нагружения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1846>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23–26 января 2018 г.



Золотов Александр Алексеевич — д-р техн. наук, профессор Московского авиационного института. Автор более 30 научных работ. Направление научных исследований: надежность и безопасность сложных технических систем. e-mail: alexandrzolotov41@mail.ru



Нуруллаев Эльмар Джаннаталиевич — старший преподаватель Московского авиационного института. Направление научных исследований: надежность и безопасность сложных технических систем. e-mail: ned@mai.ru

Increasing the durability of the aggregates of space-rocket systems under thermal loading

© A.A. Zolotov, E.D. Nurullaev

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russia

The article describes a method for predicting the reliability and increasing the durability of rocket-space systems in case of emergency and partial failures of supporting devices. It is shown that using the strategy of alternating the regular and derated modes of operation allows significant increasing the average time of reliable operation. The optimization of switching frequency between regular and derated modes of operation is presented. Areas of expedient use of cyclical operation depending on the switch reliability are determined. The efficiency of the technique is illustrated by a model example. The obtained results can serve as a guide for engineers in solving the problems of ensuring the reliability and durability of rocket and space systems in the process of developing and implementing goal-oriented space programs.

Keywords: reliability, durability, state graph, failure rate, cyclic mode, thermal loading

REFERENCES

- [1] Zolotov A.A., Odelevsky V.K., Rodchenko V.V., Chernikov A.I. *Prikladnye metody i algoritmy obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti tekhnicheskikh sistem na etape ikh razrabotki i ekspluatatsii* [Applied methods and algorithms to ensure the reliability and safety of engineering systems at the stage of their development and operation]. Moscow, MAI Publ., 2013, 352 p.
- [2] Volkov L.I. *Upravlenie ekspluatatsiey letatelnykh kompleksov* [Control of the aircraft complex operation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987, 368 p.
- [3] *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Spravochnik v 10 tomakh. Tom 10. Spravochnye dannye po usloviyam ekspluatatsii i kharakteristikam nadezhnosti* [Reliability and efficiency in technology. Handbook in 10 volumes. Vol. 10. Reference data on operating conditions and reliability characteristics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 336 p.
- [4] Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 576 p.
- [5] Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 544 p.
- [6] Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'yev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 524 p.
- [7] Emelin N.M. *Otrabotka sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya letatelnykh apparatov* [Developing aircraft maintenance systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995, 128 p.
- [8] Dorokhov A.N., Kernozhytsky V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Ensuring the reliability of complex engineering systems]. St. Petersburg, Lan Publ., 2011, 352 p.
- [9] Kravchenko I.N., Puchin E.A., Chepurin A.V. *Otsenka nadezhnosti mashin i oborudovaniya: teoriya i praktika* [Assessment of the reliability of machines and equipment: theory and practice]. Moscow, Alfa-M Publ., 2012, 336 p.

- [10] Vasilyev B.V. Prognozirovanie nadezhnosti i effektivnosti radioelektronnykh ustroystv [Prediction of radio electronic device reliability and efficiency]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 334 p.

Zolotov A.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), author of over 30 research publications. Research interests: reliability and safety of complex technical systems. e-mail: alexandrzolotov41@mail.ru

Nurullaev E.D., Assist. Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: reliability and safety of complex technical systems. e-mail: ned@mai.ru