УДК 629.7.017

Нормирование ресурса технических систем с учетом планового профилактического обслуживания, аварийных и плановых замен

А.А. Золотов, Э.Д. Нуруллаев

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы обеспечения надежности технических систем на этапе их эксплуатации. Приведены алгоритмы прогнозирования вероятностно-стоимостных параметров процесса технического обслуживания изделий. Представлены методы нормирование ресурса технических систем с учетом планового профилактического обслуживания, аварийных и плановых замен.

Представленные результаты могут быть полезными для специалистов по эксплуатации технических систем и для студентов соответствующего профиля.

Ключевые слова: надежность; ресурс; периодичность обслуживания.

Поддержание требуемого уровня работоспособности изделия при его длительной эксплуатации можно обеспечить путем проведения различных видов технического обслуживания (ТО).

В зависимости от особенностей конкретных задач могут быть использованы различные стратегии: аварийных замен, технического обслуживания по гарантированному ресурсу, плановых замен, плановых замен с зонами бездействия, строго-периодического восстановления, минимального аварийного восстановления, технического обслуживания по состоянию и др.[1,2]. В дальнейшем остановимся на рассмотрении стратегий минимального аварийного восстановления

Согласно традиционному подходу, при рассмотрении этой стратегии предполагается, что при проведении плановых замен производится полное восстановление системы. Если же система откажет на интервале Т между двумя последовательными заменами, то производится лишь минимальное восстановление, при котором после устранения отказа сохраняется та же интенсивность отказа, которая была достигнута к моменту отказа. В этом случае на каждый цикл приходится в среднем $\Lambda(T)=\int_0^T \mu(t)dt$ минимальных восстановлений, где $\mu(T)-$ интенсивность отказа системы. Соответственно удельные суммарные затраты будут равны

$$C=\frac{C_{TO}+\Lambda\cdot C_B}{T}\cdot T_{ЗАД}\ , \tag{1}$$

где $C_{TO}-$ затраты при плановых заменах; C_B- затраты при аварийных восстановлениях; $T_{ЗАД}$ – заданное время работы системы.

Величина C_B определяется затратами на проведение минимального восстановления, а так же затратами обусловленными компенсацией причиненного ущерба, либо потерей эффективности системы при ее простое в процессе ликвидации неисправности.

Согласно (1) безразмерные затраты можно представить в виде

$$\overline{C}=\frac{C}{C_{TO}}=\frac{1+\Lambda\cdot c}{T}\cdot T_{ЗАД}\quad ,\quad \text{где}\quad c=\frac{C_B}{C_{TO}}\quad .$$

. Для прогнозирования параметра Λ требуется знание показателей надежности, учитывающих деградационные процессы, протекающие в системе в процессе ее эксплуатации. При решении задачи предположим, что изменение надежности при их эксплуатации можно описать законом распределения Вейбулла

$$P(t)=e^{-\int_0^t \mu(t)dt}\quad ,$$

где $\mu(T)=\nu\cdot\mu\cdot t^{(\nu-1)}$ – интенсивность отказа; μ , ν - параметры закона.

Для закона распределения Вейбулла получим [3]

$$\Lambda(T)=\int_0^T \mu(t)dt=\mu\cdot T^{\nu}\quad .$$

Оптимальный интервал восстановления T_r, обеспечивающий минимум материальных затрат, удовлетворяет условию

$$C'_{\Sigma}=0\ . \tag{2}$$

Раскрывая выражение для производной, получим

$$\overline{C}=\frac{C}{C_{TO}}=(\frac{1+\mu\cdot T_r^{\ \nu}\cdot c}{T_r}\cdot T_{ЗАД})'=(-\frac{1}{T_r^{\ 2}}+\mu\cdot c\cdot(\nu-1)\cdot T_r^{\ \nu-2})\cdot T_{ЗАД}$$

Согласно (2) имеем

$$1=\mu\cdot c\cdot(\nu-1)\cdot T_r^{\nu}\quad .$$

Разрешая уравнение относительно T_r, найдем

$$T_r = \left\{ \frac{1}{\mu \cdot (\nu - 1) \cdot c} \right\}^{\frac{1}{\nu}} \qquad (3)$$

Для оптимальной периодичности (3) надежность системы можно оценить по соотношению

$$H = e^{-\int_0^{T_r} \mu(t)dt} = e^{-\frac{1}{c \cdot (\nu - 1)}}$$

Зависимость надежности системы от параметра c представлена на рис. 1. При проведении расчетов было принято значение $\nu = 2$.

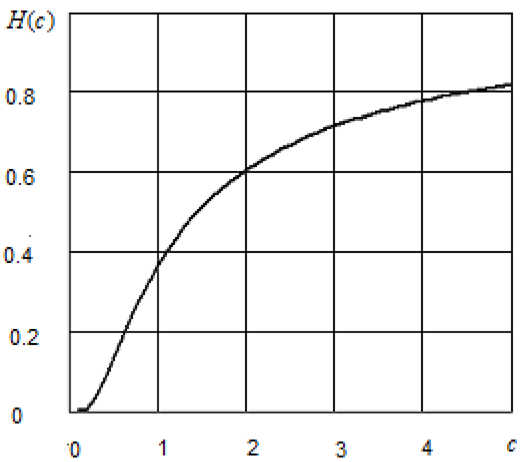

Рис. 1 Зависимость надежности системы от параметра c.

Как видно из графика в реальном диапазоне изменения параметра c, при оптимальном ресурсе, уровни безотказности системы оказываются недопустимо низкими.

Высокие требования к надежности можно обеспечить путем резервирования системы и введения профилактического обслуживания.

При проведении профилактического обслуживания с периодичностью τ осуществляется контроль работоспособности системы и проводится устранение выявленных неисправностей. Очевидно после проведения контроля система будет находится в работоспособном состоянии. Следовательно минимальную надежность системы, достигаемую на последнем цикле профилактического обслуживания перед заменой r_T, можно оценить по соотношению

$$H = \exp\left\{ -\int_{t_r - 1}^{t_r} \mu(t)dt \right\} ,$$

где t_{r-1}, t_r – соответственно моменты начала и окончания последнего цикла профилактического обслуживания.

Для оценки оптимального числа циклов до замены r_T представим соотношение для безразмерных материальных затрат в виде

$$\overline{C} = \frac{1+\mu \cdot T^{\nu} \cdot c + \frac{T}{\tau} \cdot s}{\frac{T}{\tau}} \cdot \frac{T_{ЗАД}}{\tau} = \frac{1+\lambda \cdot r^{\nu} \cdot c + r \cdot s}{r} \cdot N\ , \qquad (4)$$

где $\lambda = \mu \cdot \tau^{\nu}$ – интенсивность отказов, соответствующая условной единице измерения времени равной одному циклу;

$r = \frac{T}{\tau}$ – текущее число циклов;

$N = \frac{T_{ЗАД}}{\tau}$ – полное число циклов при эксплуатации системы;

s – затраты на проведение контроля на одном цикле обслуживания.

В дальнейшем предположим, что в процессе профилактического обслуживания проводится замена отказавших элементов .Очевидно проведение замен отдельных элементов на новые приведет к снижению потока отказов всей системы $\Omega(t)$.

Для оценки $\Omega(t)$ воспользуемся алгоритмом оценки количества отказов по циклам технического обслуживания, представленном в работе [4].

При решении поставленной задачи предположим, что в составе системы контролю подвергаются M_{00} однотипных элементов. После проведения (i-1)-го цикла контроля все отказавшие элементы (M_{i-1}) заменяются на новые, а оставшиеся элементы продолжают находится в составе устройства.

Параметры технического обслуживания, оцениваемые программой после проведения n циклов ТО, определяются треугольной матрицей $M(n)$, которая является функцией числа циклов n . В этой матрице нулевая строчка соответствует значению M_{00}, характеризующему исходное число анализируемых критических элементов системы, функционирующих на нулевом цикле ТО. Соответственно i-ой строке и j-ому столбцу матрицы соответствует элемент M_{ij} , характеризующий число элементов, функционирующих на i -ом цикле обслуживания и замененных на новые на j-ом цикле ТО. Суммарное число отказов на всех n циклах технического обслуживания определяется разностью между значением следа матрицы $tr(M(n))$ и величиной $M_{0,0}$.

Для высоких уровней надежности диагональные элементы матрицы $M_{i,j}$ фактически характеризуют суммарный поток отказов $\Omega(t)$ по всем элементам, работающим на i-ом цикле. Матрица M(n) рассчитывается по алгоритму, представленному на рис.2 [4].

```
M(n) := | for  m ∈ 0..n
        |   M_{0,0} ← 10
        | for  m ∈ 0..n
        |   a_m ← 1 − e^{−λ[(m+1)^ν − m^ν]}
        | for  i ∈ 0..n − 1
        |   for  j ∈ 0..n
        |     M_{i+1,j} ← | [M_{i,j}(1 − a_{i−j})]  if  i + 1 > j
        |                 | [[ Σ_{k=0}^{i} (M_{i,k} a_{i−k}) ]]  otherwise
        | for  i ∈ 0..n
        |   for  j ∈ 0..n
        |     M_{i,j} ← | M_{i,j}  if  i ≥ j
        |               | 0  otherwise
        | M
```

Рис. 2 Алгоритм проведения расчета матрицы M(n).

В алгоритме величина λ характеризует значение параметра масштаба для одного элемента системы, соответствующее условной единице измерения времени равной одному циклу. Параметр λ оценивается по соотношению

$$\lambda = \mu \cdot \tau^{\nu}, \tag{5}$$

где $\mu -$ параметр масштаба одного элемента, соответствующий реальному времени работы системы.

С учетом замен отказавших элементов и резервирования системы выражение для безразмерных затрат примет вид

$$\overline{C}(r) = \left[c \cdot \left(tr(M(r) - 10\right) + s \cdot r + 1\right] \cdot \varphi(\omega) \cdot N, \tag{6}$$

где $\omega -$ кратность резервирования; $c -$ относительные затраты на аварийное восстановление; $s -$ стоимость проведения одного цикла контроля;

$tr(M(r) -$ след матрицы $(M(n)$,учитывающий r строк; $N = \dfrac{T}{\tau} -$ полное число циклов обслуживания в процессе эксплуатации системы.

Кратность резерва оценивается по соотношению

$$\omega = \frac{\log Q_{ЗАД}}{Q_r}\,, \tag{7}$$

где $Q_{ЗАД} = 1 - H_{ЗАД}$ – заданный уровень вероятности отказа на завершающем цикле работы системы перед ее заменой; Q_r – прогнозируемый уровень вероятности отказа нерезервированной системы на завершающем цикле ее работы перед заменой.

Вид функции $\varphi(\omega)$ зависит от типа резервирования . Очевидно, в случае «*горячего*» резерва , имеем $\varphi(\omega) = \omega$. В общем случае функцию $\varphi(\omega\ )$ можно представить в виде в виде

$$\varphi(\omega) = \eta\omega + d\,.$$

Для высоконадежных систем вероятность отказа на завершающем цикле технического обслуживания Q_r можно оценить по соотношению

$$Q_r = \ tr(M(r) - tr(M(r-1)\ \ . \tag{8}$$

Подставляя выражения(7), (8) в соотношение (6), окончательно получим

$$\overline{C}(r) = \left[c\cdot\left(tr(M(r)-10\right) + s\cdot r + 1\right]\cdot\varphi\left\{\frac{\log\left(Q_{ЗАД}\ \right)}{\log\left[tr(M(r)) - tr(M(r-1))\right]}\right\}\cdot N \tag{9}$$

Величина затрат будет зависеть от параметра r и матрицы $M(n)$, элементы которой определяются заданием параметра λ, который рассчитывается по соотношению (5), а ,следовательно, зависит от периодичности профилактического обслуживания τ . Очевидно параметры r и τ следует назначать из условия минимизации суммарных затрат. Таким образом приходим к задаче отыскания минимума функции двух переменных (9). Решение этой задачи может быть получено графически. С этой целью по соотношению (9) рассчитывается изменение безразмерных затрат $\overline{C}(r\ ,\tau)$ по параметру r для различных τ. Для каждого значения τ оценивается оптимальное значение r, соответствующее минимуму материальных затрат. Наконец, среди различных τ выбирается то, для которого затраты будут минимальны. Для иллюстрации предлагаемого подхода рассмотрим примеры решения рассматриваемой задачи для различных видов резервирования изделий. Конкретные расчеты производились для исходных данных, представленных ниже

$$\mu = 10^{-3}\left(\frac{1}{мес.}\right)^{\frac{1}{\nu}};\quad \nu = 2;\quad M_{00} = 10;\, T_{ЗАД} = 120\,мес.;\, Q_{ЗАД} = 10^{-2};\quad c = 0.2;\quad s = 0.02\,,$$

В случае «*горячего*» резерва выражение для материальных затрат примет вид

$$\overline{C}(r) = \left[c \cdot \left(tr(M(r) - 10\right) + s \cdot r + 1\right] \cdot \left\{ \frac{\log\left(Q_{ЗАД}\right)}{\log\left[tr(M(r)) - tr(M(r-1))\right]} \right\} \cdot N$$

График зависимости $\overline{C}(r)$ представлен на рис. 3

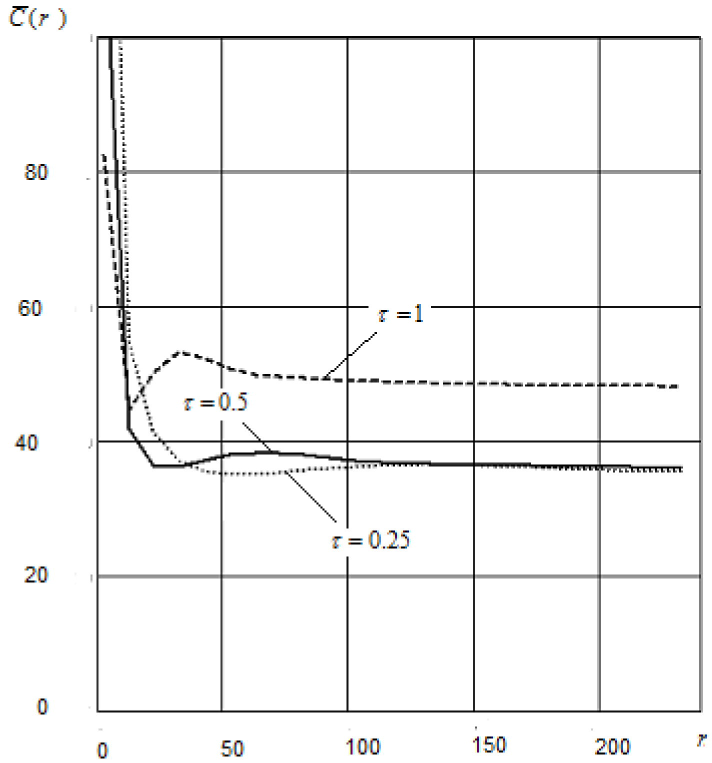

Рис. 3 Зависимость суммарных затрат $\overline{C}(r)$ от количества циклов r для различных значений $\tau = 0.25 мес., 0.5 мес., 1 мес.$ и уровня затрат на аварийное восстановление $c = 0.2$.

Как видно из графика минимум затрат достигается при значениях $\tau = 0{,}25$; 0.5 *мес.* и практически не меняется в диапазоне значений $r = 25 - 240$. Таким образом для рассматриваемых исходных данных полных замен системы в процессе ее эксплуатации можно не предусматривать. Однако при больших уровнях ущерба, обусловленного отказами отдельных элементов, проведение полных замен может оказаться экономически целесообразным. С этой целью проведем аналогичные расчеты для большего значения параметра $c = 0.35$. В этом случае характер изменения суммарных затрат представлен на рис.4

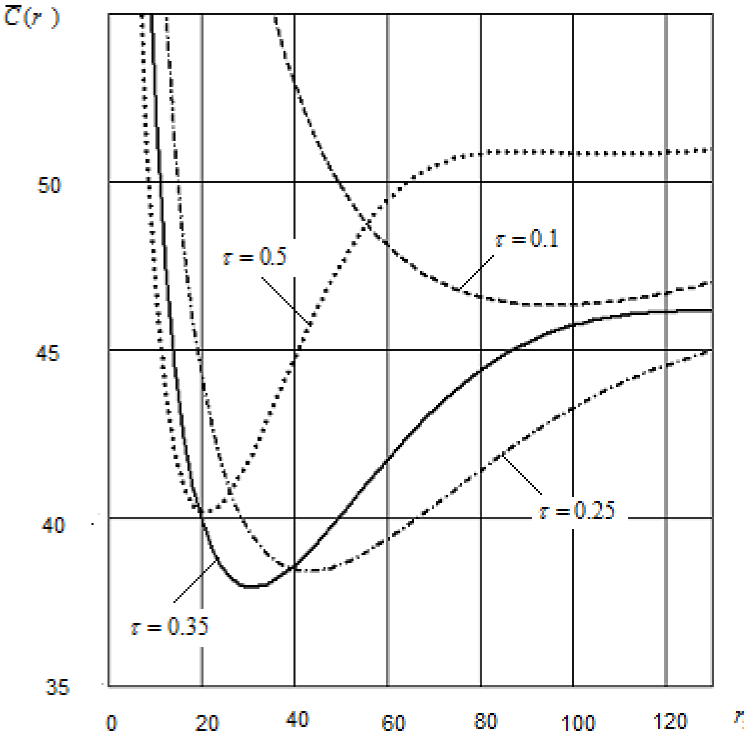

Рис. 4 Зависимость суммарных затрат $\overline{C}(r)$ от количества циклов r для различных значений $\tau = 0.1$ *мес.*,0.25*мес.*,0.35*мес.*,0.5*мес.* и уровня затрат на аварийное восстановление $c = 0.35$.

Согласно графику минимум затрат ($\overline{C}(31) = 37$ *усл.ед.*) достигается при значениях $\tau = 0.35$*мес.* и $r = 31$, что соответствует периодичности замен $T_r = r_T \cdot \tau = 11$ *мес.* и кратности резерва $\omega = 1.7$. Очевидно при практической реализации «*горячего*» резерва, его кратность должна принимать целочисленные значения. В этом случае мы приходим к необходимости использования дублированной системы кратность резерва которой равняется двум. Тогда согласно графику (см. рис. 5) для $\tau = 0.35$ *мес.* эта кратность достигается после прохождения 50 циклов эксплуатации изделия, что соответствует периодичности замен равной 18-ти месяцам. При этом материальные затраты возрастут до 40 условных единиц(см. рис.4).

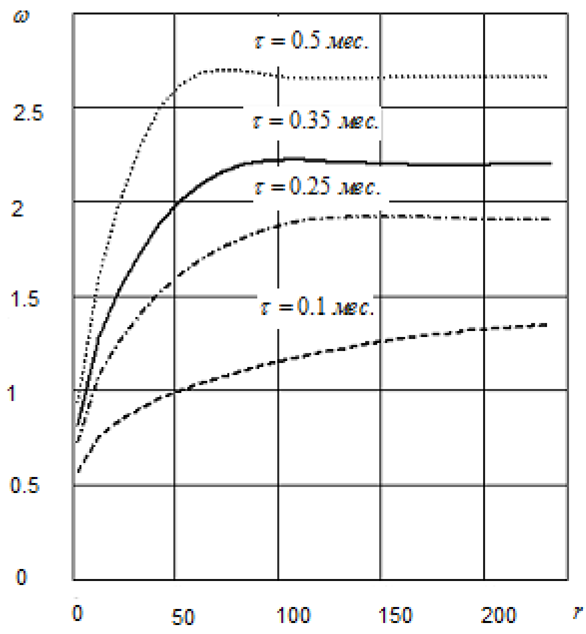

Рис.5 Зависимость кратности резерва от периодичности замен r .

Оптимальное значение кратности резерва равного 1.7 может быть обеспечено при применении *общего* или *скользящего* резервирования.

При реализации дробных уровней резервирования все изделие целесообразно разбить на несколько отдельных блоков.

В дальнейшем для обеспечения оптимального значения кратности резерва равного 1.7 рассмотрим систему из трех работающих блоков, один из которых оказывается резервным, что соответствует *общему* резервированию системы. В этом случае минимум затрат достигается для $\tau = 0.35$ *мес.* при 32 –х циклах обслуживания до замены, что соответствует периодичности замен равной 11-ти месяцам. При принятом числе циклов кратность резерва будет равна 1.73. При этом минимальные затраты составляют 35 условных единиц.

В случае *скользящего* резерва минимум затрат достигается для $\tau = 0.5$ *мес.* при 30-ти циклах обслуживания до замены, что соответствует периодичности замен равной 15-ти месяцам. При этом минимальные затраты составляют 28 условных единиц.

Оптимальная кратность резерва при этом будет равна 2.24. Полученному результату соответствует система из трех элементов один из которых находится в холодном резерве, то есть система со *скользящим* резервом.

Наконец при *параметрическом* резервировании минимум затрат достигается для $\tau = 0.75$ *мес.* при 22 –х циклах обслуживания до замены, что соответствует периодичности замен равной 16-ти месяцам. При этом минимальные затраты составляют 22-е условных единицы.

Результаты проведенного анализа показывают, что принятие конкретных параметров технического обслуживания будет зависеть от вероятностно-стоимостных характеристик анализируемых систем и конкретных условий их применения.

Основные результаты работы можно свести к следующим:

1. Представлены методы расчета ресурса технических систем, периодичности профилактического обслуживания и кратности их резерва, обеспечивающих удовлетворение заданных требований по надежности при минимальных затратах средств.
2. Предложены методы оценки параметров технического обслуживания изделий, позволяющие проводить параметрический анализ влияния различных факторов на принятие проектно – эксплуатационных решений.
3. Работоспособность представленных в работе алгоритмов проиллюстрирована на модельных примерах.

Библиографический список

1. Байхельт Ф., Франкен. П. Надежность и техническое обслуживание. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988; (392 стр.).
2. Галлеев А.Г., Золотов А.А., Перминов А.Н., Родченко В.В., Эксплуатация стартовых комплексов ракетно-космических систем. М: Изд-во МАИ, 2007; (347 стр.).
3. Гнеденко Б.В. и др. Математические методы в теории надежности. М.: Изд-во «Наука», 1965; (524 стр.).
4. Золотов А.А. Прикладные методы обеспечения работоспособности технических систем на этапе их эксплуатации. Оборонный комплекс—
-научно-техническому прогрессу России. М: ФГУП «ВИМИ». 2010. №1 ; (стр. 17-25).

Сведения об авторах

Золотов Александр Алексеевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва А-80, ГСП-3, 125993; тел.: 158-47-45; 242-75-39; 8-903-0048691

Нуруллаев Эльмар Джаннаталиевич, ассистент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), магистр.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва А-80, ГСП-3, 125993; тел.: +7-499-1584745, +7-499-1626497, 8-926-2404712