

ния оказать не может, параметры объекта обороны являются постоянными, количество тактико-огневых подразделений, для организации защиты объекта может быть назначено вышестоящим командованием и ограничено штатной структурой, то возможностью осуществления эффективной защиты транспортной коммуникации является и обоснованное размещение назначенных сил и средств.

Все указанные обстоятельства предопределяют актуальную необходимость совершенствования подходов к организации защиты транспортных коммуникаций, в случае развязывания противником вооруженной агрессии. Необходимо отметить на относительно скоротечное время развертывания пусковых установок баллистических ракет и подготовки их к пуску, полета ракеты по сравнению с потребным временем на перемещение, занятие позиционного района, развертывание и непосредственную подготовку сил и средств отражения ракетного удара. Данное обстоятельство обуславливает преимущественно заблаговременную организацию защиты коммуникаций.

Список литературы

1 **Воронин, О. В.** О возможных ударах баллистическими ракетами по крупным объектам / О. В. Воронин, И. Г. Денисенко // Наука и военная безопасность. – 2014. – № 2. – С. 57–60.

2 **Воронин, О. В.** Методика выбора позиции средств разведки формирования тактической противоракетной обороны / О. В. Воронин, С. В. Потетенко, С. В. Кругликов // Радиотехника : информационно-измерительные и управляющие системы, 2014. – № 7. – С. 3–10.

3 **Воронин, О. В.** Выбор рационального варианта построения боевого порядка формирования тактической противоракетной обороны методом итераций / О. В. Воронин // сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 32. – С. 30–38.

УДК 629.7.083

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С УЧЕТОМ ЗАТРАТ НА ПРОВЕДЕНИЕ РЕГЛАМЕНТНЫХ РАБОТ И РЕМОНТА

Р. В. КАЛЯКИН, А. А. САНЬКО

Военная академия Республики Беларусь, г. Минск

Объектом исследования является система технического обслуживания (ТО), предметом исследования – алгоритмы оптимизации систем ТО воздушных судов (ВС) с целью повысить их эффективность в рыночных условиях эксплуатации.

Актуальность и сложность решения задач анализа и синтеза систем ТО ВС в целях повышения их эффективности приводит к тому, что исследования в этой области достаточно востребованы [1]. Вопросами оптимизации

систем ТО с различных позиций, занимались ряд ученых. Так, Н. Н. Смирнов, Н. И. Владимиров, Ж. С. Черненко [2] предложили решение оптимальной периодичности и длительности ТО производить путем определения перечня работ по ТО комплектующих изделий, группировки работ по ТО ВС в определенные формы регламента и оценки экономического последствия отказа, который может быть предотвращен более частым проведением обслуживания. Недостатком данного решения является то, что обычно целевую функцию оптимизации в явном виде не удастся выразить вследствие ее многомерности, поэтому задача решается графически. Н. Н. Смирнов и А. А. Ицкович [3] предложили использовать критерии оптимальности процесса ТО на основе полученных доходов от использования ВС в исправном состоянии, но без учета в системе скрытых отказов и неисправностей. Н. М. Емелин [4] предложил использовать критерии оптимальности процесса ТО на основе полученных доходов от использования ВС в исправном состоянии, но уже с учетом наличия в системе скрытых отказов и неисправностей. Задача была решена на основе многошаговости марковского процесса, при таком подходе размерность задачи снижается до размерности решения на каждом шаге [5], что существенно упрощает математические вычисления.

Задача данного исследования состоит в том, чтобы разработать такой алгоритм оптимизации элементарной системы ТО на основе методики, предложенной в работе [4] (далее – классический алгоритм), который учитывал бы не только потери при нахождении ВС в неисправном состоянии, но и затраты на проведение регламентных работ (РР) и ремонта непрерывно контролируемых агрегатов.

Граф переходов агрегата ВС с элементарной системой ТО, представлен на рисунке 1. Физический смысл состояний графа переходов системы ТО: 1 – готовность агрегата к применению; 2 – на агрегате проводятся РР; 3 – неработоспособное состояние из-за отказов или неисправностей непрерывно контролируемых элементов; 4 – система находится в скрытом отказе, который определяется при выполнении РР.

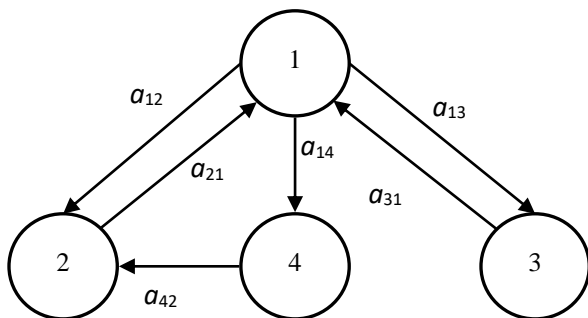


Рисунок 1 – Граф переходов агрегата ВС с элементарной системой Т

Допущение:

- 1) считается, что контроль технического состояния агрегата – достоверен;
- 2) в системе могут быть скрытые отказы и неисправности, определяемые при выполнении РР;
- 3) закон распределения потока отказов контролируемых агрегатов экспоненциальный с постоянной величиной плотности потока отказов.

Исходя из приведенного графа интенсивности a_{12} и a_{42} зависят от одного и того же параметра – периодичности проведения РР, то закрепление оптимизируемого параметра – периодичности проведения РР в качестве собственной переменной только за счет одной из интенсивностей a_{12} или a_{42} приведет к получению решения, отличному от оптимального [4]. Таким образом, для устранения этого недостатка проведем преобразование графа рассматриваемой системы по методике, предложенной в [5]. Исключим одно из состояний, описывающихся зависимыми интенсивностями: 1-2 или 4-2. Исключим состояние 4, тогда преобразованный граф состояний имеет вид (рисунок 2).

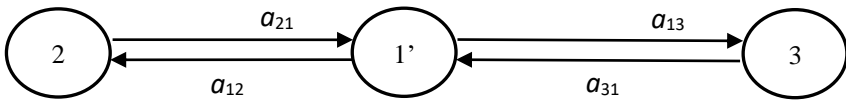


Рисунок 2 – Преобразованный граф состояний

Составляем систему дифференциальных уравнений, описывающую преобразованный граф состояний:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_1(t)}{\partial t} = -P_1(t)(a_{12} + a_{13}) + P_2(t)a_{21} + P_3(t)a_{31}; \\ \frac{\partial P_2(t)}{\partial t} = P_1(t)a_{12} - P_2(t)a_{21}; \\ \frac{\partial P_3(t)}{\partial t} = P_1(t)a_{13} - P_3(t)a_{31}. \end{cases} \quad (1)$$

Используя (1) и исходные данные, такие как k – число вариантов параметров системы ТО (пусть для 1-го состояния $k = 3$; для 2-го и 1-го состояния $k = 2$), составляем матрицы интенсивности переходов, характеризующие интенсивности перехода из i -го состояния в j -е при выборе k -го варианта:

$$\|a_1^k\| = \begin{vmatrix} a_{11}^{k=1} & a_{12}^{k=1} & a_{13}^{k=1} \\ a_{11}^{k=2} & a_{12}^{k=2} & a_{13}^{k=2} \\ a_{11}^{k=3} & a_{12}^{k=3} & a_{13}^{k=3} \end{vmatrix}, \|a_2^k\| = \begin{vmatrix} a_{21}^{k=1} & a_{22}^{k=1} \\ a_{21}^{k=2} & a_{22}^{k=2} \end{vmatrix}, \|a_3^k\| = \begin{vmatrix} a_{31}^{k=1} & a_{32}^{k=1} & a_{33}^{k=1} \\ a_{31}^{k=2} & a_{32}^{k=2} & a_{33}^{k=2} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Аналогично составляем матрицу доходов – d_i^k , в которой диагональными элементами d_{ii}^k являются доходы системы в состоянии $i = 1 \dots N$, а остальными – $d_{ij} (i \neq j)$ доходы, получаемые при переходах. Доходы рассматриваются как амортизация вложенных в них средств при разработке и производстве [1]. Если в каком-нибудь состоянии или на каком-нибудь переходе имеют место затраты, то соответствующий элемент $d_{ij} < 0$:

$$\|d_1^k\| = \begin{vmatrix} d_{11}^{k=1} & d_{12}^{k=1} & d_{13}^{k=1} \\ d_{11}^{k=2} & d_{12}^{k=2} & d_{13}^{k=2} \\ d_{11}^{k=3} & d_{12}^{k=3} & d_{13}^{k=3} \end{vmatrix}, \|d_2^k\| = \begin{vmatrix} d_{21}^{k=1} & d_{22}^{k=1} \\ d_{21}^{k=2} & d_{22}^{k=2} \end{vmatrix}, \|d_3^k\| = \begin{vmatrix} d_{31}^{k=1} & d_{32}^{k=1} & d_{33}^{k=1} \\ d_{31}^{k=2} & d_{32}^{k=2} & d_{33}^{k=2} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Проведенные исследования показали, что значения $d_{ij}^k (i \neq j)$ можно приравнять к нулю из-за своей малой величины относительно величин d_{ii}^k [4].

Для сохранения физического смысла модели (см. рисунок 2) необходимо, чтобы доходы, приносимые при совершении исключенных переходов и нахождении в исключенных состояниях, были учтены в других переходах или состояниях модели. Так как переходы 1-4 и 4-2 никаких доходов не приносят, то в состоянии 4 имеются потери от неработоспособности агрегата из-за нахождения системы в состоянии скрытого отказа. Эти потери необходимо учесть в состоянии 1' как

$$d_{11}^{k'} = C_0 P_1 / T_r - C_0 P_4 / T_r,$$

где d_{11} – доход, приносимый системой в состоянии 1'; C_0 – затраты на разработку и производство; T_r – гарантийный срок эксплуатации; $P_1 = 1$ – вероятность нахождения системы в первом состоянии; P_4 – вероятность нахождения системы в четвертом состоянии:

$$P_4 = \frac{\mu_4}{\tau_{\text{мрг}}} = \frac{1}{1 - e^{-\tau_{\text{мрг}} \omega_{\text{пр}}}} - \frac{1}{\tau_{\text{мрг}} \omega_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

μ_4 – математическое ожидание времени пребывания в состоянии – 4; $\omega_{\text{мрг}}$ – параметр потока отказов контролируемых агрегатов при выполнении РР; $\tau_{\text{мрг}}$ – периодичность проведения РР.

Значения вектора доходов системы в состоянии 2 и 3, вычисляем по эмпирической формуле

$$d_{22}^k = -\frac{C_0 P_2}{T_r} - C_{\text{пр}}; \quad d_{33}^k = -\frac{C_0 P_3}{T_r} - C_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{пр}}$ – затраты на проведения регламентных работ (PP), C_p – затраты на ремонт непрерывно контролируемых агрегатов [1]:

$$C_{\text{пр}} = \left((k_{\text{зип}} + k_{\text{пр}})C_3 + (k_{\text{эз}} + k_{\text{гсм}} + k_{\text{лс}}) \frac{C_3}{T_r} \right) \frac{\tau_{\text{пр}}}{T_r}; \quad (6)$$

$$C_p = \left((k_{\text{эз}} + k_{\text{пр}} + k_{\text{зип}}) \frac{C_3}{T_r} \right) \frac{\tau_{\text{устр}}}{\tau_{\text{устр}}^{\text{н}}}, \quad (7)$$

$k_{\text{зип}}$, $k_{\text{пр}}$, $k_{\text{эз}}$, $k_{\text{гсм}}$, $k_{\text{лс}}$ – коэффициенты, учитывающие соответствующую долю затрат от C_3 (затраты на ЗИП и расходные материалы, прочие расходы, затраты на электроэнергию, ГСМ и личный состав); $C_3 = (0,3...0,4)$; C_0 – эксплуатационные расходы [4, 7]; $\tau_{\text{пр}}^{\text{н}}$, $\tau_{\text{устр}}^{\text{н}}$ – минимально допустимая длительность PP и продолжительность устранения отказов и неисправностей непрерывно контролируемых агрегатов; $\tau_{\text{пр}}$, $\tau_{\text{устр}}$ – текущая длительность PP и продолжительность устранения отказов и неисправностей непрерывно контролируемых агрегатов.

Воспользовавшись методом динамического программирования [5], по подготовленным исходным данным определяем непосредственно ожидаемые доходы в каждом состоянии i и для каждого варианта k :

$$q_{ii}^k = d_{ii}^k + \sum_{i \neq j} a_{ij}^k d_{ij}^k \text{ при } d_{ij}^k \approx 0, \text{ то } q_{ii}^k \approx d_{ii}^k, \quad (8)$$

которые представляются в виде вектор-столбца:

$$\|q_{ii=1}^k\| = \begin{Bmatrix} q_{11}^{k=1} \\ q_{11}^{k=2} \\ q_{11}^{k=3} \end{Bmatrix}; \quad \|q_{ii=2}^k\| = \begin{Bmatrix} q_{12}^{k=1} \\ q_{12}^{k=2} \end{Bmatrix}; \quad \|q_{ii=3}^k\| = \begin{Bmatrix} d_{13}^{k=1} \\ d_{13}^{k=2} \end{Bmatrix}. \quad (9)$$

Затем выбираем в каждом векторе (9) вариант k_{mi} , которому соответствует максимально ожидаемый доход. Результат выбора записывается в виде вектор-решения:

$$f_0 = \left\| k_{m1}^0 \ k_{m2}^0 \ k_{m3}^0 \right\|. \quad (10)$$

Исходя из вектор-решения (11), составляется новая матрица интенсивностей переходов $a^{k_{mi}}$, в которой ее строки равны строкам матрицы интенсивностей переходов, соответствующим вариантам с максимальными доходами в каждом состоянии:

$$\|a_1^{k_{mi}}\| = \left\| \begin{array}{ccc} a_{11}^{k_{m1}} & a_{12}^{k_{m1}} & a_{13}^{k_{m1}} \\ a_{21}^{k_{m2}} & a_{22}^{k_{m2}} & a_{23}^{k_{m2}} \\ a_{31}^{k_{m3}} & a_{32}^{k_{m3}} & a_{33}^{k_{m3}} \end{array} \right\|. \quad (11)$$

Для определения относительных весов в систему уравнений (8) необходимо подставить значения интенсивностей переходов (11) и вектор столбца (9) соответственно для каждого из состояний. В результате получим систему $N = 3$ линейных уравнений с $(N+1)$ неизвестными:

$$g = q_{i=1}^k + \sum_{j=1}^3 a_{1j}^{k_{m1}} V_j; \quad g = q_{i=2}^k + \sum_{j=1}^3 a_{2j}^{k_{m2}} V_j; \quad g = q_{i=3}^k + \sum_{j=1}^3 a_{3j}^{k_{m3}} V_j, \quad (12)$$

где g – непосредственные доходы в каждом состоянии, усредненные по всем состояниям и отнесенные к единице времени; V_j – полный ожидаемый доход, который принесет система за время t , если в начальный момент она находилась в состоянии j .

Приняв $V_3 = 0$, находим значения других неизвестных V_1, V_2 и g .

Для улучшения решения в каждом состоянии и для каждого варианта вычисляется следующий критерий:

$$q_{2i}^k = q_{i}^k + \sum_{j=1}^3 a_{ij}^k V_j. \quad (13)$$

Величины V_j берутся равными значениями, полученными из решения системы уравнений (14). Результаты вычислений записываются в виде

$$\|q_{2i=1}^k\| = \left\| \begin{array}{c} q_{21}^{k=1} \\ q_{21}^{k=2} \\ q_{21}^{k=3} \end{array} \right\|; \quad \|q_{2i=2}^k\| = \left\| \begin{array}{c} q_{22}^{k=1} \\ q_{22}^{k=2} \end{array} \right\|; \quad \|q_{2i=3}^k\| = \left\| \begin{array}{c} q_{23}^{k=1} \\ q_{23}^{k=2} \end{array} \right\|. \quad (14)$$

Затем выбираем в результате (16) вариант k_{mi} , которому соответствует максимально ожидаемый доход. Результат выбора записывается в виде вектор-решения:

$$f_1 = \|k_{m1}^1 \ k_{m2}^1 \ k_{m3}^1\|. \quad (15)$$

Пусть элементы вектор-решения $f_0 = f_1$. Таким образом, решение найдено, т. е. итерационная процедура улучшения решения привела к выбору оптимального варианта системы ТО. В противном случае необходимо продолжать процедуру улучшения.

Функциональная схема разработанного алгоритма оптимизации представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Функциональная схема разработанного алгоритма оптимизации системы ТО

Использование разработанного алгоритма позволит найти оптимальные параметры системы ТО агрегата ВС с учетом наличия скрытых отказов и неисправностей, а также с учетом затрат на проведение регламентных работ и ремонта, что повысит их эффективность эксплуатации в рыночных условиях. Результаты решения модельной задачи подтверждают работоспособность представленного алгоритма. Сравнительная оценка разработанного алгоритма с классическим показала, что его целесообразно использовать при значении эксплуатационных расходов $C_3 \geq 0,3C_0$.

Список литературы

- 1 Писаренко, В. Н. Модели надежности и определение приемлемой периодичности технической эксплуатации стареющего парка воздушных судов / В. Н. Писаренко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 3. – С. 7–14.
- 2 Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Н. Н. Смирнов [и др.]. – М. : Транспорт, 1990. – 423 с.
- 3 Смирнов, Н. Н. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / Н. Н. Смирнов, А. А. Ицкович. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
- 4 Емелин, Н. М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов / Н. М. Емелин. – Машиностроение, 1995. – 128 с.
- 5 Ховард, Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы / Р. А. Ховард. – М. : Сов. Радио, 1964. – 192 с.