

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРЕЖДАЮЩЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

Техническое обслуживание (ТО) является неотъемлемой частью процесса эксплуатации любых технических систем, в том числе и авиационной техники (АТ).

При эксплуатации АТ в настоящее время в основном принята "жесткая" стратегия ТО, использующая исключительно априорную информацию. Применение таких стратегий эквивалентно построению разомкнутой системы программного управления по задающему и возмущающему воздействию [1], в которой объектом управления является техническое состояние (ТС) авиационной техники, а управляющим устройством – мероприятия ТО по поддержанию летной годности. Однако, априорная информация не является исчерпывающей или универсальной, и полученная модель ТО может оказаться весьма неточной и не соответствующей месту своего применения. Такая стратегия жестко predetermined изготовителем. Зачастую это приводит к значительному повышению расходов эксплуатанта по проведению ТО вследствие неучтенных условий эксплуатации, проблемам повышения ресурсов частей летательных аппаратов (ЛТА), снижению надежности отдельных узлов вследствие частых нарушений технологии производства.

Упреждающими (адаптивными) называют системы [2], в которых недостаток априорной информации восполняется за счет более полного использования текущей (апостериорной) информации, получаемой в ходе эксплуатации АТ. Использование апостериорной информации о текущем техническом состоянии с коррекцией параметров программы поддержания летной годности на основе оценки и прогноза его изменения (реализация "гибких" стратегий ТО) приводят к замкнутым адаптивным системам управления техническим состоянием.

Целью упреждающего обслуживания является управление техническим состоянием ЛТА с помощью стратегии, параметры которой изменяются в зависимости от полученной в ходе эксплуатации информации. Очевидно, для обоснования такой стратегии необходима соответствующая математическая модель системы обслуживания. Известно, что для построения таких моделей широко применяются процессы Маркова. Анализ ряда отечественных и зарубежных публикаций показывает, что основная масса разработанных моделей – это модели обслуживания по состоянию (Condition Based Maintenance Model, CBMM), а модели упреждающего обслуживания (Predictive Maintenance, PM), несмотря на их перспективность, встречаются в ТО АТ

сравнительно редко.

Например, в работе [3] рассматривается модель обслуживания с применением минимального (minimal maintenance) и полного (major maintenance) обслуживания и ремонта. В первом случае, состояние системы восстанавливается до предыдущего установленного дискретного состояния с минимальными затратами при обслуживании и работоспособного при ремонте. Во втором в обоих случаях система возвращается в полностью исправное состояние. Каждый из этих видов обслуживания используется в зависимости от текущего состояния системы, таким образом, образуя простую систему упреждающего обслуживания.

Разработан рекурсивный алгоритм для решения уравнений, построенных для разработанной системы. Дальнейшее решение проводится с целью достижения минимальной продолжительности простоев устройства, связанных с отказами и обслуживанием. Задаются затраты на обслуживание, ремонт и потери при простое и т.п. в виде цеп и проводится минимизация их суммы. Следует отметить, что для сложных систем, какими являются системы ЛА, такая модель обслуживания выглядит излишне упрощенной, поскольку видов обслуживания ЛТ очень много. Так, например, сгорание предохранителя возможно на любой стадии разрушения и приводит к отказу системы, однако его замена не сложна, и может быть произведена в ходе минимального обслуживания. Наоборот, недостаточный уровень масла в маслобаке, допущенный при минимальном обслуживании может привести к отказу двигателя и значительным затратам на его ремонт. Очевидно, оба этих отказа не должны устраняться с помощью минимального обслуживания. Для построения полноценной СВММ модели [4] необходимо предусматривать:

- пуассоновские отказы, представляющие наиболее тяжелые случаи отказа;
- многостадийные непрерывные во времени марковские процессы разрушения для прочих случаев.

В случае моделей упреждающего обслуживания задача состоит в определении оптимального состава проверок и критерия ремонта разрушающейся системы [5]. В этом случае система считается подверженной постепенному разрушению, при котором вид отказа неизвестен и выявляется в ходе проверки, с целью определения состояния системы. При обнаружении отказа производится операция по упреждающей замене агрегата. Однако такая операция, равно как и последствия отказа, повлечет значительные затраты. Оптимальная же стратегия упреждающего обслуживания должна достигать снижения вероятности отказа при минимальных затратах. Когда наблюдаемое состояние превысит некоторый заданный уровень M , изделие считается

изношенным и проводится упреждающая операция обслуживания.

Время проведения проверок, равно как и величина M , являются основными неизвестными при решении данной проблемы. Подобные величины фигурируют и для систем обслуживания по состоянию, однако не подразумевают нахождения обоих значений.

При составлении моделей могут использоваться следующие обозначения:

C_d – затраты, связанные с простоями системы в единицу времени (в произвольных единицах); C_i – затраты на проведение проверок; C_p – затраты на упреждающие действия; C_r – затраты на ремонт; $C(t)$ – суммарные затраты за время t ; $d(t)$ – время нахождения в неисправном состоянии; L – порог ремонта; $m(.)$ – функция порядка проверок; M – порог упреждающих воздействий; $N_i(t)$ – случайное число проверок в $[0, t]$; $N_p(t)$ – случайное число упреждающих действий в $[0, t]$; $N_r(t)$ – случайное число ремонтов в $[0, t]$; S – время первой замены; T_i – продолжительность проверок; $\bar{F}_{\beta, \alpha n(x)}$ – Гамма-функция выживания; $(X_t)_{t \geq 0}$ – процесс, описывающий восстановление системы (ГО); $(\bar{X}_t)_{t \geq 0}$ – процесс, описывающий разрушение системы; $X_t, \bar{X}_t$ – отдельные состояния системы в процессах восстановления и разрушения; $(Y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ – марковская цепь, описывающая состояние системы в моменты проверок $(Y_n = (X_t)_n)$.

Для стохастической модели разрушения примем следующие допущения:

1. Состояние системы во время t может быть описано случайной величиной X_t . В случае, если не производится действия по обслуживанию или ремонту, эта переменная старения превращается в стохастически возрастающую. Начальное состояние системы принимается равным 0. Система считается отказавшей, если $X_t > L$.

2. Процесс разрушения между операциями по обслуживанию $(X_t)_{t \geq 0}$ считается однородным во времени, и разрушение в пределах между временем t и u ($t < u$) не зависит от его величины до наступления t . Для описания процесса перехода между этими состояниями хорошо подходит Гамма-распределение, являющееся естественным описанием процессов с экспоненциальными скачками. Параметры распределения (α, β) могут найдены из характеристик разрушения. Принимается, что процесс $(\bar{X}_t)_{t \geq 0}$ подвержен гамма-распределению и что для всех $0 \leq s < t$ случайная величина $\bar{X}_t - \bar{X}_s$ распределена таким же образом с параметром формы $\alpha^*(t-s)$ и β :

$$f_{\alpha(t-s), \beta(x)} = \frac{1}{\Gamma(\alpha \cdot (t-s))} \cdot \beta^{\alpha(t-s)} \cdot x^{\alpha(t-s)-1} \cdot e^{-\beta x} \mathbb{I}\{x > 0\}. \quad (1)$$

3. Наблюдение за системой производится не постоянно, однако ее состояние определяется в ходе проверок. Каждая проверка обнаруживает текущее состояние мгновенно и безошибочно.

4. Отказ обнаруживается лишь во время проверки. Таким образом, отказавшая система остается в неисправном состоянии до следующей проверки. Характерным примером являются труднодоступные (например, трубопроводы) или пассивные системы. Время нахождения в отказавшем состоянии $(0; t]$ обозначается $d(t)$, при этом возникают затраты C_d в единицу времени, когда система не функционирует.

Модель обслуживания. Стратегия обслуживания управляется сведениями о состоянии системы после проверки. На каждой стадии проверки $(X_t)_{t \in N}$ ($T_0 = 0$) следует принять два решения: должны ли быть произведены упреждающие воздействия на систему и определение следующего этапа проверки. Приняв за $(X_t)_n$ состояние системы непосредственно в момент проверки, а за $(X_t)_{n+}$ – после проверки и проведения упреждающих действий, можно принять следующую схему:

- если $(X_t)_n > I$ (имеет место отказ), то производится упреждающее действие (замена) и возникают затраты C_c . После воздействия состояние системы считается полностью восстановленным: $(X_t)_{n+} = 0$;
- если $M \leq (X_t)_n < I$ (система функционирует, но величина износа велика), производится упреждающее воздействие и возникают затраты C_p ($C_p \leq C_c$). После воздействия состояние системы считается полностью восстановленным;
- если $(X_t)_n < M$, то никаких действий не предпринимается ($(X_t)_{n+} = (X_t)_n$);
- во всех перечисленных случаях время проведения следующей проверки определяется по правилу $T_{n+1} = T_n + m(X_{T_n})$, где $m(\cdot)$ – убывающая функция от $(0, M]$ до R^+ , ограниченная снизу: $m_{\min} > 0$, где R^+ – множество всех положительных чисел. При каждой проверке возникают затраты C_i .

При такой структуре существуют две основные переменные, подлежащие оптимизации с целью уменьшения затрат на обслуживание – порог "предупреждения" M и функция очередности проверок $m(\cdot)$. Для решения этой задачи строится математическая модель.

Определение эксплуатационных затрат и оптимизация стратегии ТО требуют вычисления вероятностных характеристик процесса эксплуатации системы в рамках этой стратегии. В [5] приведено несколько полезных свойств процесса $(X_t)_{t \geq 0}$, позволяющих упростить решение задачи, поскольку они позволяют применять

общепринятые принципы теории восстановления. Так, дискретный случайный по времени процесс описывающий состояние системы в моменты проверок $(X_t)_{t \in N}$ представляет собой цепь Маркова в линейном пространстве $[0, M]$ ($Y_0=0$) с известной функцией плотности распределения. Поскольку цепь почти достоверно убывает до 0, состояние 0 называется восстановленным. Это доказывает существование стационарной оценки в пределах $[0, M]$ для $(X_t)_{t \in N}$. Для нахождения несмещенной

плотности вероятности цепи $B(x)$ находится решение выражения правдоподобия: $\pi(\cdot) = \int_{[0, M]} P(\cdot | x) \pi(dx)$. Решение имеет вид: $\pi(dx) = a \cdot \delta_0(dx) + (1-a) \cdot b(x)dx$, где $0 < a < 1$ и

$b(x)$ – функция плотности распределения в $[0, M]$. Решение [5] приводит к выражению

$$a = \frac{1}{M \left(1 + \int_0^M B(x) dx \right)}, \text{ где } B(x) = \frac{1-a}{a} \cdot b(x).$$

Оптимизация стратегии обслуживания. Решение задачи состоит в определении порога предупреждения M и функции $m(\cdot)$, минимизирующих затраты в единицу времени на большом отрезке времени. В действительности, речь идет о совокупностях $[M, m]$, таких, что затраты на проведение проверок и упреждающие действия уравнивают затраты, вызванные отказами при $t \rightarrow \infty$. Таким образом, решение должно выражать затраты на бесконечном отрезке времени относительно двух переменных – M и $m(\cdot)$.

Функция затрат. Примем $N_i(t)$ как число проверок, $N_p(t)$ как количество упреждающих воздействий, $N_c(t)$ как количество ремонтов и $d(t)$ как время нахождения в неисправном состоянии в интервале $[0, t]$. Суммарные затраты на обслуживание за время t в этом случае определяются как:

$$C(t) = C_i \cdot N_i(t) + C_p \cdot N_p(t) + C_c \cdot N_c(t) + C_d \cdot d(t). \quad (2)$$

Эта функция затрат зависит от упомянутых двух переменных. Дальнейшей задачей является оптимизация функции на большом отрезке времени:

$$EC_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E_0(C(t))}{t}. \text{ Проблемой является определение предела к бесконечности оценки}$$

E каждой из случайных величин N_i, N_p, N_c, d в единицу времени. Поскольку все эти величины являются функциями процесса $(X_t)_{t \geq 0}$ от времени t , необходимо выразить предел по времени функции этого процесса. Используя элементы теории восстановления, предел к бесконечности можно заменить на соотношение оценок в каждом цикле восстановления. Однако, в данном случае рассмотрение дискретного во времени процесса, описывающего состояние системы на каждом этапе восстановления,

выглядит громоздким, и более выгодным представляется использование полуустановительных свойств процесса $(X_t)_{t \geq 0}$ и связанной с ним марковской цепи $(Y_n)_{n \in N}$. В [5] описывается решение задачи с применением свойств полуустановительных процессов, где оценки E_π параметров N_i, N_p, N_c, d по отношению к мере π определяются в ходе интегрирования, например:

$$E_\pi(N_p(I_1)) = \int_{[0, M]} (\bar{F}_{\beta, \text{can}(x)}(M-x) - \bar{F}_{\beta, \text{can}(x)}(L-x)) \pi(dx). \quad (3)$$

В численном виде решение можно представить в виде изогрaмм функции двух параметров процесса проверок для заданных затрат C_i, C_p, C_c, C_d , и порога M . Можно найти величину оптимальных затрат и значений параметров проверки, определить применимость избранной стратегии ТО для заданных условий.

Таким образом, модели упреждающего обслуживания позволяют решать задачи оптимизации процессов ТО (минимизация затрат на ТО и затрат на простои АТ), позволяя определять параметры системы ТО на основании информации, полученной в процессе эксплуатации.

Библиографический список

1. И.Свердцев П. А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке. М.: Высшая школа, 1989.
2. Червоный А. А., Лукьяненко В.И., Котин Л. В. Надежность сложных систем. М.: Машиностроение, 1976.
3. S.H. Sim, J. Endrenyi. A failure-repair model with minimal and major maintenance Reliability // IEEE Transactions on Reliability, Volume 42, Mar 1993. P. 134-140.
4. M.M. Hosseini, R.M. Kerr, R.B. Randall. An inspection model with minimal and major maintenance for a system with deterioration and Poisson failures. // IEEE Transactions on Reliability, Volume 49, Issue 1, Mar. 2000, P. 88-98.
5. Grall, A. Dicuile, L. Berenguer, C. Roussignol, M. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for deteriorating system // Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, PA, USA, January 2001. P. 150-155.