

УДК 656.7

## **Управление ремонтпригодностью в полном эксплуатационном цикле объекта**

В.Н. Писаренко

Рассматривается новый подход к ремонтпригодности как управляемому процессу эксплуатации, основанный на измерении показателей и параметров эксплуатации, обработки этих данных, анализе и выработки управляющего воздействия на объект эксплуатации.

### **Ключевые слова**

авиационная техника; наработка; простой; ожидание; распределение отказов; надежность; управление; ремонтпригодность

Поступление новых зарубежных воздушных судов и других технических средств в отечественную гражданскую авиацию выявило ряд существенных проблем, в том числе и в ремонтпригодности объекта. Необдуманное внедрение иностранных компонентов в авиационную транспортную систему без всестороннего учета всех факторов эксплуатации и ремонта приводят к срыву расчетных значений ремонтпригодности и к сверхнормативным простоям дорогостоящей техники. Отсутствие запасных частей и расходных компонентов ведет к полетам воздушных судов с отложенными дефектами и необоснованному применению MEL – минимального перечня неисправностей, с которыми разрешена эксплуатация. Выявление оценок и факторов ремонтпригодности в настоящее время перехода на эксплуатацию зарубежной авиационной техники приобретает особую актуальность и требует всестороннего анализа.

Поставка задачи данной статьи заключается в обосновании нового подхода к ремонтпригодности как к управляемому процессу эксплуатации авиационной техники. Для решения данной задачи требуется уточнение понятия ремонтпригодности, разработка модели ремонтпригодности, выявление определяющих параметров ремонтпригодности,

установление оптимального закона управления ремонтпригодностью и выработка управляющего воздействия на объект эксплуатации по управлению ремонтпригодностью.

В отечественной и зарубежной технической литературе достаточно большое внимание уделено ремонтпригодности, но однозначной формулировки этой проблемы нет. Так, например, по ГОСТ 27.002-89 «Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта». В БЭС «Ремонтпригодность – одно из основных свойств технического объекта, характеризующее его надежность; заключается в приспособленности объекта к проведению работ по его техническому обслуживанию и ремонту». */Большой Энциклопедический словарь, 2000./* По стандартам США ремонтпригодность описана в MIL-HDBK-470A [1] как: «Относительная непринужденность и экономия времени и ресурсов, с которыми изделие может быть сохранено или восстановлено к указанному состоянию, когда обслуживание выполнено квалифицированным персоналом, используя предписанные процедуры и ресурсы, на каждом предписанном уровне обслуживания и ремонта». В этом контексте, это – функция проекта.

Сформулируем ремонтпригодность как вероятность того, что отказавшее оборудование будет восстановлено к приемлемому рабочему состоянию в определенное время. Уточним понятие ремонтпригодности как параметр объекта, нацеленный на уменьшение времени ремонта, в противоположность обслуживанию, которое является действием для восстановления и поддержания исправности объекта эксплуатации [2, 3]. Установим, что главная цель ремонтпригодности состоит в обеспечении максимальной пригодности объекта эксплуатации к ремонту [4]. Другие цели ремонтпригодности включают: уменьшение времени, трудовых затрат и других ресурсов на техническое обслуживание, упрощение обслуживания и использования объекта [5].

Рассмотрим новый подход к ремонтпригодности как к фактору управления обслуживанием и ремонтом объекта. Эффективность эксплуатации может быть достигнута, только при серьезном рассмотрении вопросов ремонтпригодности и проблем, которые возникают в течение полного эксплуатационного цикла объекта. Это означает, что программа ремонтпригодности должна включать диалог между изготовителем и пользователем во время всего эксплуатационного цикла объекта. Этот диалог касается потребностей обслуживания пользователя и других требований для объекта и ответа изготовителя на эти потребности и требования [6].

Полный эксплуатационный цикл может быть разделен на следующие четыре стадии [3]: • стадия I – развитие концепции; • стадия II – проверка правильности концепции; • стадия III – производство; • стадия IV – эксплуатация.

В стадии I первичная ремонтпригодность идентифицируется в потребность эффективности объекта, транслируется в набор эксплуатационных требований и критерий объекта в дополнении к политике обслуживания и материально-технического обеспечения.

В течение стадии II эксплуатационные требования, сформулированные в предыдущей стадии, развиваются и совершенствуются далее относительно требований объекта, заложенных при проектировании.

В стадии III объект реализован, изготовлен, проверен, поставлен, и, в некоторых случаях, ремонтпригодность установлена в технический пакет данных, но ошибки могут подорвать ремонтпригодность объекта.

В стадии IV объект используется, логистически поддерживается и соответственно изменяется. В течение стадии эксплуатации становятся ясными требования готовности и характеристики объекта, а также действия по доработки, обучению, поставки и эксплуатационным материалам. В это наиболее критическое время становятся ясными специфические требования ремонтпригодности потому, что демонстрируется фактическая рентабельность и материально-техническое обеспечение объекта. Кроме того, связанные ремонтпригодностью данные могут быть получены от реального опыта работы для использования в перспективе.

Имеются много связанных с ремонтпригодностью характеристик объекта, которые должны быть подчеркнуты в течение проекта внедрения зарубежной авиационной техники. Некоторые из них: модульная конструкция, взаимозаменяемость, человеческие факторы, безопасность, стандартизация, средства управления, освещение, вес, смазка, достижимость, установка, обучение, регулирование и калибровка, инструментальные средства, маркирование и кодирование, испытательное оборудование, руководства, рабочая среда, размер и форма, признаки отказа и т.д. [3, 5].

Различные меры измерения используются в анализе и управлении ремонтпригодностью: например, средняя наработка до ремонта ( $T_{Cp \ до \ R}$ ), среднее время ремонта ( $T_{Cp \ R}$ ) и среднее время простоя при ремонте ( $T_{Cp \ np \ R}$ ). [2, 4]

Функции ремонтпригодности используются, чтобы определить вероятность того, что ремонт, начинающийся во время  $t = 0$ , будет закончен во время  $t$ .

Рассмотрим основные размерности и функцию ремонтпригодности с точки зрения управлением ремонтпригодностью.

Средняя наработка до ремонта ( $T_{Cp до R}$ ) – наиболее широко используемая мера ремонтпригодности – измеряет время, требуемое для вычисления времени наступления ремонта. Оно выражено следующим соотношением

$$T_{Cp до R} = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i T_i}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (1)$$

где  $k$  – номер единиц или частей;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов единиц или частей для  $i = 1, 2, 3 \dots$ ;  $T_i$  – время корректирующего обслуживания / ремонта, требуемое, чтобы восстановить исправность единицы / части изделия.

Обычно время восстановления следуют показательному, логарифмически-нормальному и нормальному закону распределения вероятности отказов [6].

Среднее время простоя при ремонте ( $T_{Cp пр R}$ ) может быть описано как полное время требуемое для восстановления системы к выполнению работы. Оно состоит из времени непосредственного ремонта, времени административной задержки и времени логистической задержки. Время административной задержки – время простоя из-за административных ограничений. Логистическое время задержки – время ожидания требуемых ресурсов, таких как запасная часть, определенное испытание или средство.

$T_{Cp пр R}$  определяется следующим соотношением

$$T_{Cp пр R} = T_{Адм} + T_{Лог} + T_R \quad (2)$$

где  $T_{Адм}$  – административная время задержки;  $T_{Лог}$  – логистическое время задержки;  $T_R$  – продолжительность самого ремонта – время, необходимое для выполнения задачи ремонта.

Состояние эксплуатационной готовности можно выразить следующим соотношением

$$A_i = \frac{T_{Cp до R}}{T_{Cp до R} + T_{Cp пр R}} \quad (3)$$

Функция ремонтпригодности для любого распределения вероятностей определяется следующим выражением

$$F_R(t) = \int_0^t f_R(t) dt \quad (4)$$

где  $t$  – время;  $F_R(t)$  – функция ремонтпригодности;  $f_R(t)$  – функция плотности распределения вероятности времени ремонта или обслуживания.

Функция плотности распределения вероятности времени ремонта или обслуживания имеет вид

$$f_R(t) = \left( \frac{1}{T_{доP}} \right) \exp\left( -\frac{t}{T_{доP}} \right) \quad (5)$$

Таким образом, модель ремонтпригодности может быть представлена как определенное количественное представление объекта эксплуатации и анализа результатов эксплуатации, которые определяются группой параметров ремонтпригодности характеризующихся временем простоя, эксплуатационной надежностью и функцией ремонтпригодности.

Введем коэффициент пропорциональности  $E$  между продолжительностью ремонта  $T$  и относительным распределением вероятности времени ремонта как

$$E = dT/df_R(t) \quad (6)$$

Используя свойство инвариантности дифференциалов, запишем уравнение (4) в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF_R(t)}{dt} &= af_R(t) \\ ds &= adt \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $a$  – скорость изменения состояния объекта (скорость ремонта),  $s$  – текущее состояние объекта управления.

Систему уравнений (7) решим на оптимум, используя «принцип максимума» Понтрягина [9]. Приняв скорость изменения состояния объекта управления  $a$  за управляющее воздействие на ремонтпригодность  $U$  и, введя фазовые координаты состояния объекта управления  $s_1 = F_R(t)_I$  и  $s_2 = f_R(t)$  фазового пространства срока ремонта  $T$ , получаем систему дифференциальных уравнений в фазовых координатах

$$\left. \begin{aligned} \frac{ds_1}{dt} &= as_2 \\ \frac{ds_2}{dt} &= U \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая, что срок ремонта  $T$  не может быть беспредельным, введем ограничение по текущему времени  $t \leq T$ . Тогда задача оптимального управления ремонтпригодностью, математически может быть сформулирована следующим образом: требуется найти оптимальный алгоритм, согласно которому фазовая точка переместится из положения  $s_{1i}, s_{2i}$  в положение  $s_{1j}, s_{2j}$  за минимальное время.

Для рассматриваемого случая функция Гамильтона [9]

$$H = \psi_1 s_2 a + \psi_2 U \quad (9)$$

где  $\psi_1, \psi_2$  – вспомогательные переменные, для определения которых имеется система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= -\frac{dH}{dx_1} \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= -\frac{dH}{dx_2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Продифференцировав, получаем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= 0 \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= -\psi_1 a \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

которая удовлетворяет функции вида

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(t) &= C_1 \\ \psi_2(t) &= C_2 - C_1 a t \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Функция  $H$  будет максимальна относительно  $U$  при условии

$$\frac{dH}{dU} = \psi_1(t) + \psi_2(t) E(T) = 0 \quad (13)$$

Подставляя значение  $\psi_1(t)$  и  $\psi_2(t)$  в уравнение (12), находим

$$C_1 = (C_1 a t - C_2) E(T), \quad (14)$$

откуда

$$E(T) = \frac{C_1}{C_1 a t - C_2} = \frac{1}{a t - \frac{C_2}{C_1}} \quad (15)$$

Из уравнения (15) можно сделать заключение о том, что критерием оптимальности системы – единственным параметром характеризующим состояние ремонтпригодности в диапазоне изменения состояний объекта управления, ограниченном согласно уравнению изменения состояний, является его функция  $E(T)$  изменяющаяся по линейно убывающему закону. Приняв обозначение  $\beta_1 = C_2/C_1$  имеем

$$E(T) = \frac{1}{t - \beta_1} \quad (16)$$

Подставив значение  $E(T)$  в начальное условие, определяем функцию управления ремонтпригодностью

$$U(t) = \frac{dT}{t - \beta_1} \quad (17)$$

Это оптимальный закон управления ремонтпригодностью, который можно сформулировать следующим образом: для того, чтобы процесс управления ремонтпригодностью объекта решал заданную основную задачу и являлся оптимальным, существует экстремальная функция продолжительности ремонта относительно областей управления ремонтпригодностью.

Итак управление ремонтпригодностью означает вероятность, что отказавшее оборудование будет восстановлено к приемлемому рабочему состоянию за определенное время с минимальными затратами времени, труда и других ресурсов, упрощение ремонта, обслуживания и использования объекта.

Таким образом, приведенные аргументы и разработанные формулы позволяют обосновать новый подход к ремонтпригодности как управляемому параметру оптимизации процесса технического обслуживания и ремонта авиационной техники и наземных средств эксплуатации объекта.

Оптимизация ремонтпригодности заключается в выполнении ремонта в оптимальное время и минимально возможные сроки, и для этого необходимо учитывать не только среднее время простоя при ремонте, но и время простоя из-за административных ограничений, а также время логистической задержки на доставку необходимых запасных частей и расходных материалов.

Управление ремонтпригодностью направлено на предупреждение отказов и неисправностей путем принятой в эксплуатации стратегий технического обслуживания и ремонта оборудования (по состоянию и наработке). В общем случае управляющее воздействие  $Y_i$ , определяется попаданием объекта эксплуатации в определенное состояние процесса технической эксплуатации и формируется в зависимости от определенной величины отклонения  $X_i$  определяющего параметра  $X$  от его нормативного значения  $X_n$ .

Управляющее воздействие на объект эксплуатации и ремонта определяется выражением

$$Y_j = f(X_n - X_i) \quad (20)$$

В качестве определяющего параметра используются выходные параметры уровня ремонтпригодности, определяемого временем простоя, эксплуатационной надежностью и функцией ремонтпригодности. Управление ремонтпригодностью осуществляется по замкнутой схеме и формируется по величине отклонения выходных параметров. В этом случае достигается наиболее сильное влияние на протекание процесса изменения технического состояния объекта эксплуатации.

В управлении ремонтпригодностью важнейшим фактором является рентабельность ремонта. По зарубежным данным [8] ремонт экономически целесообразен только в том случае если затраты на него не превышают 75% первоначальной стоимости изделия. В условиях России на фактор ремонтпригодности могут влиять особые условия как, например, невозможность приобретения нового изделия взамен отказавшего по причине снятия с производства изделия или эмбарго на поставку изделий, а также необходимость пополнения неснижаемого запаса оборудования и запчастей.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. [http://www.barringer1.com/mil\\_files/MIL-HDBK-470A.pdf](http://www.barringer1.com/mil_files/MIL-HDBK-470A.pdf), 1997
2. AMCP-706-133 Engineering Design Handbook: Maintainability Engineering Theory and Practice / Washington, D.C. 1976, 147 p
3. Niebel B.W. Engineering Maintenance Management / New York, Marcel Dekker, 1994, 247 p.
4. AMCP 706-134 Engineering Design Handbook: Maintainability Guide for Design / Washington, D.C., 1972, 176 p.
5. Smith D.J. and Babb A.H. Maintainability Engineering / New York, John Wiley & Sons, 1973, 234 p
6. Смирнов Н.Н., Ицкович А.А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / М.: Транспорт, 1987, 272 с.
7. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / М.: Высшая школа, 1982, 231 с.
8. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2010 / Boeing Commercial Airplanes, Seattle, Washington, U.S.A., June 2011



### **Сведения об авторе**

Писаренко Виктор Николаевич, доцент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета), к.т.н.

тел.:8-846-3345683, 89171640093, e-mail: dexron545@gmail.com