

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ АГРЕГАТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Рассмотрены вопросы создания системы оптимизации режима контроля агрегатов функциональных систем воздушных судов. Разработан критерий оптимизации, построена оптимизационная модель, сформулировано определение базового процесса оптимизации, приведена методика исследования факторов, учитываемых при оптимизации.

Одним из главных показателей деятельности авиакомпаний является эффективность использования воздушных судов, повышение которой зависит от эффективности процесса технического обслуживания агрегатов функциональных систем воздушных судов. Проведение технического обслуживания агрегатов воздушных судов должно быть адаптировано к техническому состоянию этих агрегатов (стратегия технического обслуживания по фактическому состоянию). Техническое состояние агрегатов функциональных систем воздушных судов определяют во время контроля. Таким образом, возникает задача выработки правила принятия решения о необходимости проведения работ по техническому обслуживанию по результатам контроля. Решение этой задачи взаимосвязано с задачей определения моментов проведения контроля. Работы по техническому обслуживанию, выполняемые по результатам контроля, назовем профилактическими работами. Целью профилактических работ является восстановление технического состояния агрегатов функциональных систем воздушных судов. Рассмотрим невосстанавливаемые агрегаты функциональных систем воздушных судов, техническое состояние которых можно однозначно определить по величине одного контролируемого параметра. В дальнейшем такой параметр будем называть определяющим параметром. Если величина определяющего параметра находится в пределах $[\Pi_{\min}, \Pi_{\max}]$ агрегат считается работоспособным. Область $[\Pi_{\min}, \Pi_{\max}]$ будем называть областью работоспособности. Допустим, что определяющий параметр изменяется от Π_{\min} к Π_{\max} , контроль производится через равные промежутки наработки контролируемого агрегата - периоды контроля. Решение о проведении профилактических работ по результатам контроля осуществляется по определяющему параметру. Решение о проведении профилактических работ принимается в том случае, если в момент контроля величина определяющего параметра попала в поле упреждающего допуска. Режим контроля, показанный на рис. 1, представляет собой совокупность определяющего параметра, период контроля и упреждающий допуск на параметр. Режим контроля предусматривает установление количественных связей между значениями упреждающего допуска и периодом контроля, т.е. установление взаимосвязи между правилом принятия решения о проведении профилактических работ и моментами проведения контроля. При определении режима контроля необходимо принимать во внимание, что он должен быть оптимальным в каком-то определенном смысле, т.е. должен быть задан критерий оптимизации. Как показывает анализ [1,2], под критериями оптимизации понимают комплекс, состоящий из критериев оптимизации и ограничений.

Критерии оптимизации группируют по характеру и числу учитываемых параметров, виду эффективности: интегральные, экономические и технические, лимитирующие диапазон

желаемых значений, размерные и безразмерные. Важным этапом выбора критериев оптимизации является их нормирование - приведение к единой системе измерений и определение приоритетов критериев. Необходимым условием применения того или иного критерия является его функциональная зависимость от основных характеристик системы, которые подлежат оптимизации.

Точечной оценкой критерия оптимизации является показатель оптимизации - количественная характеристика степени достижения цели.

Задача выбора критериев оптимизации режима контроля является весьма сложной и может рассматриваться в различных аспектах. Однако в любом случае необходимо учитывать надежность агрегатов функциональных систем воздушных судов и эффективность режима контроля. Для оценки надежности агрегатов функциональных систем воздушных судов используют: вероятность отказа или безотказной работы, плотность распределения времени безотказной работы, интенсивность отказов, параметр потока отказов и др. Эффективность режима контроля оценивается различными показателями: надежностью, готовностью к применению, стоимостью и т.д. Рассматривая задачу оптимизации режима контроля как обратную задачу оптимизации технических систем, оцениваем экономическую эффективность режима контроля. В этом случае рекомендуемым критерием оптимизации выступают приведенные к единице наработки суммарные расходы, связанные с контролем, профилактическими работами и устранением последствий отказа. Причем учитываются только те расходы, которые изменяются при изменении режима контроля. Таким образом, критерий оптимизации имеет следующий вид:

$$S_{\text{сум}} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Структурно критерий (1) включает в себя приведенные расходы на проведение контроля S_k , профилактических работ по результатам контроля $S_{\text{пр}}$ и устранение последствий отказа агрегата в полете S_o . Следовательно, критерий оптимизации примет вид:

$$S_k + S_{\text{пр}} + S_o \rightarrow \min.$$

Ограничениями обратной задачи оптимизации технических систем являются требуемые по техническим требованиям показатели качества функционирования агрегата. Качество функционирования агрегатов функциональных систем воздушных судов определяется их надежностью. Основными показателями, характеризующими надежность невосстанавливаемых агрегатов, являются вероятность безотказной работы $P(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$. Для многих агрегатов функциональных систем воздушных судов приведенные показатели являются нормированными и задаются в технических требованиях. Предлагается в качестве ограничений использовать интенсивность отказов $\lambda_{\text{тр}}$ и вероятность безотказной работы $P_{\text{тр}}$ агрегатов функциональных систем воздушных судов. Так как показатели $P(t)$ и $\lambda(t)$ - нестационарные величины, а накладываемые на них ограничения являются стационарными (фиксированными), то в качестве показателей надежности агрегатов функциональных систем воздушных судов принимаем максимальную интенсивность отказов λ_{max} и минимальную вероятность безотказной работы - P_{min} на рассматриваемом интервале наработки. Максимальную интенсивность отказов λ_{max} и минимальную вероятность безотказной работы P_{min} будем называть критическими показателями надежности, а ограничения, накладываемые на показатели надежности $\lambda_{\text{тр}}$ и $P_{\text{тр}}$, ограничивающими показателями надежности.

Учитывая выбранный основной критерий оптимизации и ограничения, задачу оптимизации РК представим в виде:

$$\begin{cases} S_{\text{сум}} \rightarrow \min, \\ \lambda_{\text{тр}} < \lambda_{\text{max}}, \\ P_{\text{min}} > P_{\text{тр}}. \end{cases} \quad (2)$$

Выделяют два класса задач оптимизации [1; 2]:

- безусловной оптимизации (глобальный минимум находится внутри допустимого множества исходных данных);
- условной оптимизации (глобальный минимум может находиться на границе допустимого множества исходных данных).

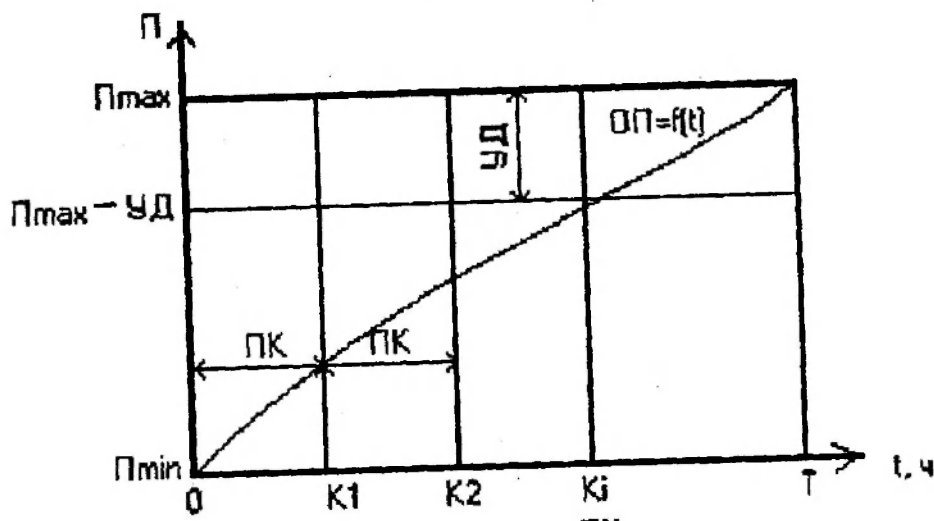


Рис. 1. Динамика определяющего параметра:

t – наработка; K_i – моменты контроля; ПК – период контроля;
 УД – упреждающий допуск; $ОП = f(t)$ – функция определяющего параметра;
 P_{max} , P_{min} – границы области работоспособности; T – интервал оптимизации;
 P – значение определяющего параметра

Задачу оптимизации режима контроля следует рассматривать, как задачу условной оптимизации, из-за ограничения допустимого множества режимов контроля. Аналитическое условие существования глобального минимума суммарных стоимостных потерь вида (2) не найдено [1; 2].

В настоящее время целый ряд работ посвящен решению задачи оптимизации режима контроля. В работах [1;2] оптимизация производилась на основании специальных оптимизационных моделей с помощью ЭВМ. Действие факторов, влияющих на оптимизацию, моделировалось соответствующими показателями, а решение представлено в форме аналитических и графических зависимостей оптимизации режима контроля от действия этих факторов. Однако отсутствие на первом этапе исследований достаточно мощных ЭВМ и трудности, связанные с разработкой специального программного обеспечения, не позволили достаточно полно учесть множество факторов, влияющих на оптимизацию режима контроля. Поэтому результаты проведенной оптимизации режима контроля не обладают универсальностью, необходимой для практического применения. В современных условиях благодаря широкому распространению компьютерной техники появилась возможность разработки более совершенной модели оптимизации режима контроля, которая позволяет учесть одновременное действие нескольких факторов. При этом необходимо разработать ряд показателей, учитывающих совместное действие факторов, влияющих на оптимизацию. Информационной основой такой модели оптимизации являются статистические данные о изменении технического состояния; динамики определяющего параметра; надежности; стоимости технического состояния агрегатов функциональных систем воздушных судов. Исходя из постановки задачи оптимизации режима контроля важнейшей частью оптимизационной модели является блок имитации динамики ОП. Предлагается моделирование динамики определяющего параметра проводить с помощью

марковской модели [1;2;3]. Для упрощения расчетов применяют марковскую цепь, размеченный граф которой показан на рис.2.

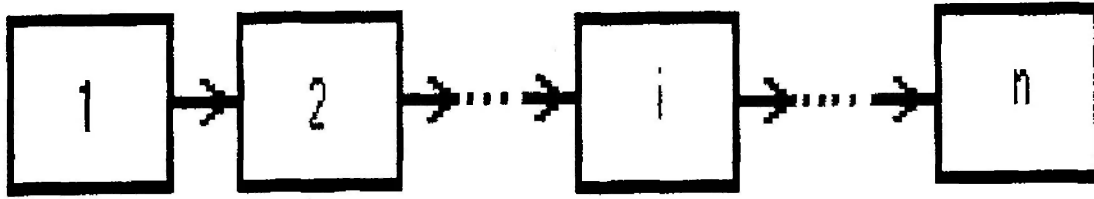


Рис. 2. Граф марковской цепи:
1, 2, i, n — состояния марковской цепи

Такое упрощение практически не влияет на точность результатов оптимизационных расчетов [1; 2]. Аналитический аппарат, позволяющий оценить динамику определяющего параметра, при марковской аппроксимации представляет собой систему уравнений Колмогорова-Чепмена. Число состояний (квантов) марковской цепи принимаем равным семи, причем первое состояние – наилучшее с точки зрения технического состояния, а седьмое соответствует отказу агрегата. Величины квантов одинаковы, а значение определяющего параметра в каком-либо кванте равно среднеарифметическому значению границ кванта. Оценивание переходных интенсивностей λ_{ij} между соседними i, j состояниями марковской цепи производят на основании статистических данных, полученных при контроле технического состояния агрегатов на эксплуатации. Обработка статистических данных для оценки интенсивностей перехода вызывает наибольшие трудности.

При использовании статистических данных необходимо исключить непредставительные данные и обосновать возможность использования обобщенной статистической информации. Получение обобщенной статистической информации основывается на использовании теории подобия при преобразовании неоднородной статистической информации в однородную. При рассмотрении результатов испытаний однотипных агрегатов с точки зрения принадлежности их к общей генеральной совокупности должно быть установлено, что определяющие параметры этих агрегатов являются статистически подобными. Объем выборки можно ограничить 30 агрегатами [1; 2].

В настоящее время на практике применяют два основных способа регистрации значения определяющего параметра. Условно их можно назвать индивидуальным и обезличенным. При индивидуальном способе через некоторые промежутки времени регистрируются значения контролируемых параметров с указанием формального признака конкретного агрегата, к которому относятся значения этих параметров. При обезличенном способе - значения параметров регистрируются без указания признака агрегата, к которому они относятся.

Методы оценки переходных вероятностей марковской модели процесса изменения определяющих параметров агрегатов функциональных систем воздушных судов различаются по виду исходных данных об этом процессе. Существуют два основных вида исходных данных: полные данные (известна последовательность смены значений определяющих параметров каждого агрегата), агрегированные данные (известно распределение значений определяющих параметров всех контролируемых агрегатов в течение времени T с интервалом dt). Полные данные имеются в случае индивидуального способа регистрации значений определяющих параметров, а агрегированные - в случае обезличенного. При

полных данных оценка переходных вероятностей может быть произведена непосредственно по методу максимального правдоподобия. Оценку переходных вероятностей при агрегированных данных необходимо производить путем решения системы уравнений Колмогорова-Чепмана для переходных вероятностей [3]. Для расчета интенсивностей перехода вероятность перехода следует разделить на среднеарифметическое время между двумя соседними регистрациями.

Расчет основного критерия оптимизации представляет собой определение минимума функции приведенных к единице наработки суммарных стоимостных потерь. Для этого приравняем к нулю частные производные функции приведенных к единице наработки суммарных стоимостных потерь:

$$dS_{\text{сум}}/dP_k=0, \quad (3)$$

$$dS_{\text{сум}}/dU_d=0,$$

где dP_k - период контроля; dU_d - упреждающий допуск.

Функцию приведенных к единице наработки суммарных стоимостных потерь представим в виде:

$$S_{\text{сум}}=(C_k P_k + C_{\text{пр}} P_{\text{пр}} + C_o P_o)/T_n,$$

где C_k , $C_{\text{пр}}$, C_o - единичные стоимости контроля, профилактических работ и устранения последствий отказа; P_k , $P_{\text{пр}}$, P_o - вероятности контроля, профилактических работ и отказа агрегата на протяжении интересующего нас интервала наработки; T_n - фактическая наработка агрегата.

Фактическую наработку агрегата определяют по формуле:

$$T_n=T P_n,$$

где P_n - вероятность исправного функционирования контролируемого агрегата на протяжении интервала наработки T .

Вероятности P_k , $P_{\text{пр}}$, P_o , P_n рассчитывают с использованием марковской модели динамики определяющего параметра с учетом показателей периода контроля и упреждающего допуска.

Анализ литературных источников [1; 2] показывает невозможность аналитического расчета формулы (3), поэтому расчет функции приведенных суммарных стоимостных потерь целесообразно производить численным методом. Параллельно с расчетом функции приведенных суммарных стоимостных потерь необходимо рассчитывать критические показатели надежности (λ_{max} , P_{min}). Результатом такого расчета может быть определение значения приведенных суммарных стоимостных потерь и критических показателей надежности для каждого из возможных режимов контроля.

Определение оптимального режима контроля сводится к выбору такого режима, приведенные суммарные стоимостные потери которого минимальны, а критические показатели надежности - соответствуют требуемым. Прямой перебор всех возможных режимов контроля весьма затруднителен, поэтому стратегией моделирования предусмотрен направленный, поэтапный поиск оптимума.

В задачах условной оптимизации такие методы поиска оптимума, как метод условного градиента, штрафных функций, мало приемлемы из-за небольшой сходимости результатов поиска оптимума и невозможности применения, если допустимое множество исходных данных имеет сложную структуру. В этом случае целесообразно поиск оптимума осуществлять методом дихотомии (методом пассивного поиска оптимума). Метод

дихотомии предусматривает поэтапный, направленный поиск оптимума. На первом этапе задаются граничные значения режима контроля и шаг их изменения. Если полученный оптимальный режим контроля не удовлетворяет требованиям точности, то граничные значения режима контроля изменяются. Новые граничные значения режима контроля задаются в области близкой к найденному оптимуму. Для увеличения точности расчетов шаг изменения режима контроля уменьшается. Процесс поиска оптимума продолжается до получения удовлетворительных по требованиям точности результатов.

Область применения предлагаемой модели оптимизации режима контроля ограничена:

- возможностью адекватной аппроксимации случайного процесса изменения определяющего параметра марковским процессом;
- возможностью оценки технического состояния агрегатов функциональных систем воздушных судов одним определяющим параметром;
- возможностью достаточно точного определения стоимостных потерь при контроле, проведении профилактических работ и отказах;
- минимальным периодом контроля, который равен времени типового полета воздушного судна;
- необходимостью учета календарного времени эксплуатации агрегатов.

Описанная оптимизационная модель может быть реализована в виде пакета прикладных программ для ЭВМ.

Разработка оптимизационной модели позволяет перейти к проведению численных экспериментов, направленных на исследование оптимального режима контроля агрегатов функциональных систем воздушных судов. Рассмотрим факторы, которые необходимо учитывать в процессе оптимизации режима контроля. Факторы характеризуют: техническое состояние агрегата и динамику изменения его определяющего параметра, общие ограничения процесса оптимизации, характеристики режима контроля, стоимостные потери, связанные с проведением контроля, профилактических работ и устранением последствий отказа.

Многие из перечисленных факторов исследованы в работах [1; 2].

В качестве одной из характеристик контроля предлагается ввести ошибку оценки определяющего фактора при контроле. Ошибки оценки определяющего параметра при контроле приводят к неправильному определению величин этих параметров, возникающему вследствие неточности приборов измерения, ошибок технического персонала, неточности методик приведения и т.д. По аналогии с ошибками контроля будем различать ошибки оценки первого (пропуск цели) и второго рода (ложная тревога). Ошибкой оценки определяющего параметра первого рода является пропуск факта попадания определяющего фактора в поле учреждающего допуска при контроле. Ошибкой оценки определяющего фактора второго рода является ложное признание факта попадания определяющего параметра в поле упреждающего допуска при контроле. Ошибки оценки определяющего параметра при контроле характеризуются вероятностями этих ошибок первого (пропуск цели) и второго (ложная цель) рода. Вероятность этих ошибок оценки может изменяться в пределах от 0 до 1.

Исследование оптимального режима контроля связано с выбором интервала наработки агрегата, на котором проводится оптимизация - интервалом оптимизации. На этом интервале факторы, учитываемые при оптимизации, должны быть постоянны. Интервал оптимизации характеризует общие ограничения процесса оптимизации режима контроля.

В литературе [1;2] исследована зависимость оптимального режима контроля от многих из перечисленных факторов, но не достаточно изучено одновременное действие нескольких факторов. Это связано с тем, что нет общепринятого определения процесса оптимизации РК в идеальном (базовом) случае. Компенсацией этого недостатка могут стать определение

базового процесса оптимизации режима контроля и разработка показателей, учитывающих одновременное действие нескольких факторов. Методика оценки влияния факторов должна предусматривать исследование изменения оптимального режима контроля относительно оптимального режима контроля базового случая оптимизации.

Основой оптимизационных расчетов является расчет динамики определяющего параметра, поэтому определение базового процесса оптимизации должно основываться на определении динамики определяющего параметра в каком-то оговоренном (базовом) случае. Предлагается называть базовой динамикой определяющего параметра агрегата функциональных систем воздушных судов, которая может быть аппроксимирована стационарной поглощающей марковской цепью первого порядка с равными между собой интенсивностями переходов между состояниями, при условии пребывания определяющего параметра в нулевой момент времени в первом состоянии, наилучшем с точки зрения работоспособности.

Базовым будем называть процесс оптимизации режима контроля невосстанавливаемых агрегатов функциональных систем воздушных судов, с базовой динамикой определяющего параметра, при отсутствии ошибок оценки определяющего параметра.

Основным показателем, характеризующим техническое состояние агрегата при базовой динамике определяющего параметра, может стать показатель БСП – отношение интервала оптимизации к отношению ширины работоспособной области и средней интенсивности изменения определяющего параметра.

Расчет показателя БСП ведется следующим образом:

$$\text{БСП} = R / (\Pi / \lambda),$$

где R - интервал оптимизации; Π - ширина работоспособной области; λ - средняя интенсивность постепенного изменения определяющего параметра.

Показатель БСП позволяет увязать величину интервала оптимизации и ожидаемую наработку на отказ. Применение показателя БСП может существенно сократить объем численных экспериментов, направленных на исследование зависимости оптимального режима контроля от динамики определяющего параметра.

План проведения экспериментов должен предусматривать исследование базового процесса оптимизации режима контроля и изучение зависимости оптимального режима контроля от перечисленных факторов. Обработка результатов экспериментов может позволить построить функциональные зависимости оптимального режима контроля от основных факторов и разработать рекомендации по расчету оптимального режима контроля агрегатов функциональных систем воздушных судов, находящихся на эксплуатации.

Таким образом, основным направлением повышения эффективности системы оптимизации режима контроля агрегатов функциональных систем воздушных судов является комплексный учет множества конструктивно-технологических, эксплуатационных и экономических факторов. Оценка влияния факторов производится по изменению оптимального режима контроля относительно оптимального режима контроля базового случая оптимизации. Для расчета оптимального режима контроля разработана модель оптимизации. Базой модели является марковская аппроксимация динамики определяющего параметра контролируемого агрегата. Критерием оптимизации выступили приведенные к единице фактической наработки агрегата суммарные стоимостные потери при техническом обслуживании, ограничениями являются минимальная вероятность безотказной работы агрегата в полете и максимальная интенсивность отказов на протяжении интервала оптимизации. Входом модели являются исследуемый диапазон режима контроля и показатели, характеризующие факторы, учитываемые при оптимизации. Выходом модели являются характеристики исследованного диапазона режима контроля и оптимального режима контроля. Характеристики всего исследованного диапазона режима контроля

позволяють уточнити оптимальний режим контролю, з урахуванням вимог показателів надійності агрегата.

С допомогою розробленої оптимізаційної моделі методом чисельних експериментів необхідно дослідити оптимальний режим контролю як в базовому випадку оптимізації, так і в випадках, відрізняються від базового. Обробка результатів експериментів дозволить побудувати функціональні залежності оптимального режиму контролю від основних факторів і розробити рекомендації по розрахунку оптимального режиму контролю агрегатів функціональних систем повітряних суден, що перебувають на експлуатації.

Список литературы

1. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.
2. Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Трайнев В.А. Статистическая оптимизация качества функционирования электронных систем. – М.: Энергия, 1974. – 264 с.
3. Кулик Н.С. Теоретические основы и практическая реализация методов оценки влияния основных эксплуатационных факторов на техническое состояние ГТД. Автореферат дис. на соискание ученой степени д-ра. техн. наук. – К.: КИИГА, 1993. – 31 с.
4. Ли Ц. Оценивание параметров марковских моделей по агрегированным временным рядам. Пер.с англ. – М.: Статистика, 1977. – 221 с.

Стаття надійшла до редакції 9 березня 1999 року.

Олег Миколайович Цуриков (1949) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації у 1973 році. Кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної експлуатації літальних апаратів, декан по роботі з іноземними студентами Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор понад 40 наукових праць в області технічної експлуатації та діагностування авіаційної техніки.

Oleh M. Tsurikov (b.1949) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1973). PhD (Eng), ass. professor of Technical Maintenance of Aircraft Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Dean of Foreign Students Department. Author of more than 40 publications on maintenance and monitoring of aircrafts.

Ігор Анатолійович Терейковський (1967) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації у 1992 році. Кандидат технічних наук, асистент кафедри технічної експлуатації літальних апаратів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор понад 10 наукових праць в області технічної експлуатації та діагностування авіаційної техніки.

Igor A. Terejkovsky (b. 1967) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1992). PhD (Eng) tutor of Technical Maintenance of Aircraft Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 10 publications on maintenance and monitoring of aircrafts.