

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧЕ МИНИМИЗАЦИИ УЩЕРБА ОТ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Абрамов М. С.

ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, Россия (432000, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42), e-mail: beavisabra@yandex.ru.

В настоящей работе анализируется вероятность отказа системы автоматического регулирования давления (САРД) как компонента системы кондиционирования воздушного судна (ВС). Оценка плотности вероятности отказа САРД построена на основе корректировки оцениваемой экспертно базовой вероятности отказа характеризующими объект коэффициентами старения, отказности и подверженности отказам в воздухе. Также в работе предлагается набор управленческих решений (УР), направленных на снижение вероятности отказа САРД (как способа повышения безопасности полетов), описано влияние этих решений на вероятность отказа. Для выбора оптимального набора управленческих решений предлагаются три стратегии – минимизация совокупного ущерба от затрат на реализацию решений и устранение последствий вероятных авиационных происшествий (АП) по причине отказов САРД, минимизация затрат на УР при фиксированной вероятности отказа системы автоматического регулирования давления, минимизация вероятности отказа САРД при фиксированном бюджете на УР.

Ключевые слова и фразы: система автоматического регулирования давления самолета, оптимальное управление, вероятность отказа, управленческое решение.

OPTIMAL CONTROL IN PROBLEM OF AUTOMATICAL PRESSURE REGULATION SYSTEM FAULT'S DAMAGE MINIMIZATION

Abramov M. S.

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia (432000, Ulyanovsk, Lev Tolstoy street, 42), e-mail: beavisabra@yandex.ru.

Fault probability of automatical pressure regulation system (APRS) as a component of aircraft's air-conditioning system is analyzed in this paper. Estimation of APRS fault probability density based on basic probability (estimated by experts) and corrected by coefficients of object's oldness, faultness and air-faultness is constructed. Also paper contains set of managerial decisions (MD) for APRS fault probability reduction (as a method of aircraft safety increasing). Influence of MDs upon fault probability is described. Three strategies is considered for optimal choice of managerial decision's set – minimization of summary material damage (of MD's realization and APRS faults), minimization of APRS fault probability under conditions of fixed budget and minimization of MD's cost under conditions of fixed APRS fault probability.

Key words and phrases: automatical pressure regulation system, optimal control, fault probability, managerial decision.

Введение

Причиной трети авиапроисшествий и половины авиационных инцидентов в России за 2004–2008 годы являются отказы авиационной техники [1], прежде всего, это отказы шасси и двигателей, систем кондиционирования воздуха (СКВ) и управления самолетом [1–2]. Поэтому оценивание вероятности отказа любой из этих систем и их компонент (САРД – подсистема системы кондиционирования) и последующее предложение набора решений по снижению этой вероятности является актуальной задачей безопасности полетов. Целью настоящей работы является рассмотрение подхода к оцениванию вероятности отказа САРД воздушного судна (ВС), управленческих решений, направленных на снижение этой вероятности, а также предложение способов выбора оптимального набора УР как решения

задач оптимизации, реализующих различные стратегии авиакомпании (АК). Перейдем к первой из целей, а именно, оцениванию вероятности отказа исследуемой подсистемы.

Оценка плотности вероятности отказа САРД

Пусть $P(t)$ – оценка вероятности отказа САРД в течение часа от момента времени t (т.е. за период $[t; t + 1$ (час)]). Обозначим через $\hat{P}(t)$ оценку плотности вероятности $P(t)$, т.е.

$$P(t) = \int_t^{t+1} \hat{P}(s) ds. \quad (1)$$

Обозначим $\hat{P}_0(t)$ экспертную оценку базовой вероятности отказа САРД, которую умножим на индивидуальные для ВС коэффициенты старения (S), отказности (F) и подверженности отказам в воздухе (V):

$$\hat{P}(t) = \hat{P}_0(t) \cdot S(t) \cdot F(t) \cdot V_0(t), \quad (2)$$

где t – текущее время. Рассмотрим далее функции $S(t)$, $F(t)$ и $V(t)$.

Коэффициент старения $S(t)$ является оценкой изменения вероятности отказа САРД в зависимости от остатка выделенного ресурса основных агрегатов подсистемы и наработки с начала эксплуатации как ВС в целом, так и основных агрегатов (под основными понимаются агрегаты, отказ которых существенно влияет на отказ САРД). Коэффициент старения равен

$$S(t) = T \cdot S_A(t) + \frac{(1-T)}{d} \cdot \sum_{i=1}^d S_M^i(t) \cdot \prod_{i=1}^d Q_i(t), \quad (3)$$

где d – количество типов основных агрегатов подсистемы, T – показатель значимости «неосновных» агрегатов, показывающий, как часто к отказу подсистемы ВС приводят отказы деталей, не содержащихся в списке основных. Функции $S_A(t)$, $S_M^i(t)$ и $Q_i(t)$ рассмотрим подробнее.

1) Для оценки коэффициента $S_A(t)$ старения ВС используется модель, аналогичная предложенной Б. Гомпертцом для описания законов старения живых организмов [5]:

$$S_A(t) = \exp[a(W(t) - b(t_0))], \quad (4)$$

где $W(t)$ – наработка воздушного судна с начала эксплуатации до момента времени t , b – средняя наработка с начала эксплуатации самолетов парка на момент начала прогноза, a – коэффициент масштабирования.

2) Коэффициенты $S_M^i(t)$ старения агрегатов i -го типа предполагаются равными

$$S_M^i(t) = \exp \left[\sum_{j=1}^n a_i (W_i^j(t) - b_i(t_0)) \right], \quad (5)$$

где $W_i^j(t)$ – наработка j -го агрегата i -го типа с начала эксплуатации до момента времени t , $b_i(t_0)$ – средняя по парку наработка агрегатов i -го типа с начала эксплуатации до момента t_0

начала прогноза, a_i – коэффициент масштабирования, n – кратность резервирования агрегата [3].

3) Коэффициент ресурсного состояния основных агрегатов $Q(t)$ рассчитывается на основе анализа коэффициентов такого типа для отдельных видов агрегатов. Предположим, что при выработке более ν выделенного ресурса R_i вероятность отказа агрегата возрастает в μ раз ($0 < \nu < 1$, $\mu > 1$). Тогда коэффициент ресурсного состояния предполагается равным:

$$Q_i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\nu + (1-\nu) \cdot \mu}, W(T) < \nu \cdot R_i \\ \frac{\mu}{\nu + (1-\nu) \cdot \mu}, \text{ иначе} \end{cases} . \quad (7)$$

Показатель ресурсного состояния агрегатов с n -кратным резервированием вычисляется как произведение таких коэффициентов всех n агрегатов.

Коэффициент отказности $F(t)$ является оценкой изменения вероятности отказа подсистемы в зависимости от её подверженности к отказам. Предполагается, что $F(t)$ зависит от подверженности отказам и неисправностям САРД, её основных агрегатов, а также содержащей её системы кондиционирования. Данный показатель вычисляется по формуле:

$$F(t) = K_S \cdot F_S(t) + K_U \cdot F_U(t) + K_M \cdot F_M(t). \quad (8)$$

Рассмотрим компоненты формулы (8) подробнее.

1) Коэффициент отказности агрегатов СКВ F_S вычисляется по формуле

$$F_S(t) = \frac{N_c}{N_p} \cdot \frac{W_p(t)}{W_c(t)}, \quad (9)$$

где $W_p(t)$ – суммарная наработка парка ВС с начала эксплуатации до момента времени t , $W_c(t)$ – наработка данного самолета за то же время, N_p – количество отказов агрегатов системы по парку с начала эксплуатации, N_c – количество отказов агрегатов системы с начала эксплуатации на данном воздушном судне.

2) Коэффициент отказности агрегатов САРД обозначен $F_U(t)$.

3) Коэффициент отказности основных агрегатов обозначен $F_M(t)$.

Параметры $F_U(t)$ и $F_M(t)$ вычисляются по формуле, аналогичной (9). Для усреднения показателей отказности вводятся коэффициенты значимости показателей отказности подсистемы (САРД) – K_U , её основных агрегатов – K_M и системы, в которую она входит (кондиционирования) – K_S . Все коэффициенты значимости предполагаются

положительными числами, в сумме равными единице, и определяют значимость параметров $F_S(t)$, $F_U(t)$ и $F_M(t)$.

Оценка $V(t)$ подверженности САРД отказам в воздухе равна:

$$V(t) = M_S \cdot V_S(t) + M_U \cdot V_U(t), \quad (10)$$

где $V_S(t)$ – подверженность системы кондиционирования отказам в воздухе с начала эксплуатации до момента времени t ; $V_U(t)$ – подверженность САРД отказам в воздухе за тот же интервал времени. Коэффициенты $V_S(t)$ и $V_U(t)$ вычисляются по формуле, аналогичной (9). Обозначим коэффициенты значимости оценок $V_S(t)$ и $V_U(t)$ символами M_S и M_U соответственно (предполагаются положительными, равными в сумме единице).

При прогнозировании вероятности отказа САРД показатели отказности и подверженности отказам в воздухе при отсутствии управленческих решений предполагаются неизменными, т. к. рост интенсивности отказов стареющего парка нивелируется улучшением технологии обслуживания ВС. Неизменным предполагается и показатель ресурсного состояния основных агрегатов $Q(t)$, поскольку выделенный ресурс агрегатов может продлеваться заводом-изготовителем. В то же время наработка ВС с начала эксплуатации, очевидно, растет, поэтому растет и коэффициент старения $S(t)$. Поэтому в случае отсутствия УР в течение периода прогноза вероятность отказа САРД в период с t_0 до t вычисляется по формуле (11), что следует из выражений (1)–(3).

$$P(t) = \hat{P}_0(t_0) \cdot F(t_0) \cdot V(t_0) \cdot \int_{t_0}^t [T \cdot S_A(\theta) + (1-T) \cdot Q(t_0) \cdot S_M(\theta)] d\theta. \quad (11)$$

Возможные управленческие решения

Для корректировки результатов прогноза, полученного по формуле (11), АК может принять управленческие решения, некоторые из которых рассмотрим далее.

1) По построению модели единственным показателем, повышающим со временем вероятность отказа САРД, является коэффициент старения, поэтому одним из эффективных УР является перераспределение наработки в пользу воздушных судов с меньшей, чем среднепарковая, вероятностью отказа САРД. Рассмотрим влияние данного УР на вероятность отказа данной подсистемы. Пусть средняя в течение срока прогноза наработка k -го воздушного судна парка составляет β_k часов в день. Вычислим величину

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^{t_0+t} S(\theta) d\theta, \text{ где } t \text{ – глубина прогноза (согласно формуле (11) остальные характеристики}$$

плотности вероятности отказа постоянны). Для этого введем обозначения:

$$\Delta W_i(t) = \sum_{j=1}^{n_i} W_i^j(t) - n_i \cdot b_i(t), \quad (12)$$

$$\Delta W(t) = W(t) - b(t). \quad (13)$$

Величина $\Delta W_i(t)$ показывает отклонение агрегатов i -го типа по наработке СНЭ от среднепаркового показателя, $\Delta W(t)$ – отклонение ВС от средней наработки по парку. Тогда в приведенных обозначениях справедлива формула:

$$\Phi(t) = \frac{T \cdot \exp(a \cdot \Delta W(t_0))}{a \cdot \beta_k} \cdot (\exp(a \cdot \beta_k \cdot t) - 1) + \frac{(1-T) \cdot \prod_{i=1}^d Q_i(t_0)}{d} \cdot \sum_{i=1}^d \frac{\exp(a_i \cdot \Delta W_i(t_0))}{a_i \cdot n_i \cdot \beta_k} \cdot (\exp(a_i \cdot n_i \cdot \beta_k \cdot t) - 1). \quad (14)$$

2) Другим решением, направленным на снижение вероятности, является замена агрегатов, близких к выработке ресурса на новые, что существенно уменьшает коэффициенты ресурсности и старения основных агрегатов, а значит, и ВС в целом. Пусть в моменты σ_i^j предполагается замена j -го агрегата i -го вида на другой, где $i=1..d$, $j=1..n_i$. В случае если замена не планируется $\sigma_i^j = +\infty$. Предположим, что агрегат с наработкой

$$W(\sigma_i^j) = W(t_0) + \beta_k \cdot (\sigma_i^j - t_0)$$

заменяется на агрегат с наработкой \hat{W}_i^j (для нового агрегата $\hat{W}_i^j = 0$). Стоимость замены агрегата обозначим $C\sigma_i^j$. Обозначим также ΔW_i^j приращение наработки в момент так называемой разладки, т.е. замены агрегата (см. [4]). Тогда

$$\Delta W_i^j = W(\sigma_i^j) - \hat{W}_i^j. \quad (15)$$

$$S_M^i(t) = \exp \left[\sum_{j=1}^{n_i} a_i (W_i^j(t_0) + \beta_k \cdot (t - t_0) - b_i(t_0) - \Delta W_i^j \cdot I\{t \geq \sigma_i^j\}) \right], \quad (16)$$

$$Q_i(t) = \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1 + (\mu - 1) \cdot [1 - I\{t \geq \sigma_i^j\}] \cdot I\{W_i^j(t_0) + \beta_k \cdot (t - t_0) > \nu \cdot R_i\}}{\nu + \mu \cdot (1 - \nu)}. \quad (17)$$

3) Третье решение заключается в обновлении оборудования, т. е. замене агрегатов некоторого вида на их аналоги. Пусть в момент η_i^j предполагается замена j -го агрегата i -го вида на агрегат нового вида, который отказывает в среднем в h раз реже ($h > 1$). Тогда отказность агрегатов i -го типа изменится по правилу (18), отказность же САРД в целом – по правилу (19):

$$F_M^i(t) = F_M^i(t_0) \cdot \left(1 - \frac{h_i - 1}{n_i \cdot h_i} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} I\{t \geq \eta_i^j\} \right), \quad (18)$$

$$F_M(t) = \sum_{i=1}^d \omega_i \cdot F_M^i(t_0) \cdot \left(1 - \frac{h_i - 1}{n_i \cdot h_i} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} I\{t \geq \eta_i^j\} \right), \quad (19)$$

где $\sum_{i=1}^d \omega_i = 1$ (через ω_i обозначены коэффициенты значимости агрегатов i -го вида для АП).

Стоимость замены предположим равной $C\eta_i$. Дополнительно при подобном УР изменяются коэффициенты старения и ресурсного состояния агрегатов i -го типа по правилам:

$$S_M^i(t) = \exp \left[\sum_{j=1}^n a_i (W_i^j(t_0) + \beta_k \cdot (t - t_0) - b_i(t_0) - \Delta W_i^j \cdot I\{t \geq \eta_i^j\}) \right], \quad (20)$$

$$Q_i(t) = \prod_{j=1}^{n_i} \frac{1 + (\mu - 1) \cdot [1 - I\{t \geq \eta_i^j\}] \cdot I\{W_i^j(t_0) + \beta_k \cdot (t - t_0) > \nu \cdot R_i\}}{\nu + \mu \cdot (1 - \nu)}. \quad (21)$$

4) Наконец, суть четвертого решения в закупке нового оборудования для диагностики дефектов САРД. Пусть в моменты π_i закупается оборудование стоимостью $C\pi_i$ для диагностики агрегатов i -го типа. Тогда предположив, что подверженность отказам в воздухе деталей типа уменьшится в g_i раз, получим:

$$V(t) = V(t_0) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^d \omega_i \cdot \left(1 - \frac{1}{g_i} \right) \cdot I\{t \geq \pi_i\} \right). \quad (22)$$

Таким образом, проанализировано четыре управленческих решения, направленных на понижение вероятности отказа САРД, однако на практике разумным является их комплексное применение. Чтобы оценить совокупное влияние описанных решений, объединим по возрастанию моменты $\{\sigma_i^j, \eta_i^j, \pi_i\}$ во множество $\{\kappa_i\}, i=1..D$, где $\kappa_0 = t_0$. Соответствующие моментам $\{\kappa_i\}$ стоимости обозначим C_i . Тогда из (1) получаем:

$$P^k(t) = \hat{P}_0(t_0) \cdot \left(T \cdot \sum_{i=0}^M F^k(\kappa_i) \cdot V^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{A,k}(\theta) d\theta + (1-T) \cdot \sum_{i=0}^M F^k(\kappa_i) \cdot V^k(\kappa_i) \cdot Q^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{M,k}(\theta) d\theta \right), \quad (23)$$

где функции $F^k(t), V^k(t), Q^k(t), S_{A,k}(t), S_{M,k}(t)$ меняются в зависимости от выбранного набора управленческих решений по правилам (16–22).

Для различных авиакомпаний могут быть значимы следующие задачи оптимизации:

1) Минимизация совокупного ущерба от УР и авиапроисшествий:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^D C_i + C \cdot \hat{P}_0(t_0) \cdot \sum_{k=1}^m \left(T \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{A,k}(\theta) d\theta + (1-T) \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot Q^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{M,k}(\theta) d\theta \right) \right\}, \quad (24)$$

где минимизация производится по параметрам β_k, κ_i . Здесь и далее произведение $F^k(\kappa_i) \cdot V^k(\kappa_i)$ для краткости обозначено $FV^k(\kappa_i)$.

2) Минимизация затрат на УР при фиксированной вероятности АП:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^D C_i \left| \hat{P}_0(t_0) \cdot \sum_{k=1}^m \left(T \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{A,k}(\theta) d\theta + (1-T) \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot Q^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{M,k}(\theta) d\theta \right) \leq P^{MAX} \right. \right\}, \quad (25)$$

где минимизация вновь производится по параметрам β_k, κ_i . Через P^{MAX} обозначен фиксированный предельно допустимый для компании уровень вероятности отказа САРД.

3) Минимизация вероятности при фиксированном бюджете на УР:

$$\min \left\{ \hat{P}_0(t_0) \cdot \sum_{k=1}^m \left(T \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{A,k}(\theta) d\theta + (1-T) \cdot \sum_{i=0}^D FV^k(\kappa_i) \cdot Q^k(\kappa_i) \cdot \int_{\kappa_i}^{\kappa_{i+1}} S_{M,k}(\theta) d\theta \right) \sum_{i=1}^D C_i \leq C^{MAX} \right\}, \quad (26)$$

где по-прежнему переменны β_k, κ_i . Через C^{MAX} обозначен бюджет компании на управленческие решения по понижению вероятности отказа САРД.

Заметим также, что помимо указанных в пунктах (2–3) ограничений по бюджету и уровню безопасности полетов, возможны также иные ограничения на решения задач (24–26):

1) Независимо от выбора УР наработка парка ВС не должна изменяться:

$$\sum \beta_k = const; \quad (27)$$

2) В случае если ограничен не только совокупный бюджет на УР до конца периода прогноза, но и бюджет на каждый месяц (день, год), справедливо

$$\sum_{i=1}^D C_i \cdot I\{\kappa_i \leq t\} \leq C^{MAX}(t), \quad (28)$$

где $C^{MAX}(t)$ – максимальные затраты компании на УР с начала прогноза до t .

3) Производство новых узлов и агрегатов, равно как и оборудования для диагностики, может быть ограничено ресурсами завода-изготовителя, поэтому

$$\sum_{j=1}^{n_i} I\{\sigma_i^j \leq t\} \leq R\sigma_i(t) \quad (29)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} I\{\eta_i^j \leq t\} \leq R\eta_i(t), \quad (30)$$

где $R\sigma_i(t)$ – максимально возможный объем продаж агрегатов i -го типа изготовителем с начала прогноза до t , $R\eta_i(t)$ – максимальный объем продаж оборудования для диагностики дефектов агрегатов i -го типа изготовителем с начала прогноза до момента времени t .

Заключение

Оценка стоимости и эффективности управленческих решений, выбор приемлемой стратегии и решение соответствующей задачи оптимизации позволяет авиакомпании разработать наиболее эффективный план по введению УР. Кроме того, полученные результаты могут применяться для оценивания вероятности отказа других сложных технических объектов (транспортные средства, вычислительная техника и т.д.), их систем и подсистем, и выбора УР, направленных на минимизацию ущерба от отказов.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013, а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках постановления правительства РФ № 218.

Список литературы

1. Анализ влияния надёжности на безопасность полётов по типу ВС / М., 2009. – URL: <http://www.flysafety.ru/files/razdel1.pdf> (дата обращения: 28.07.12).
2. Анцелиович Л. Л. Надёжность, безопасность и живучесть самолета / М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
3. Когге Ю. К., Майский Р. А. Основы надёжности авиационной техники. – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
4. Липцер Р. Ш., Ширяев А. Н. Статистика случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 696 с.
5. Gompertz B. On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – Vol. 115. – 1825. – P. 513-585.

Рецензенты:

Кемер Александр Робертович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск.

Андреев Александр Сергеевич, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности и теории управления, декан факультета математики и информационных технологий ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск.

Криштоп Виктор Владимирович, д.ф.м.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика», Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, профессор Университета Kwangwoon University, Korea.