

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

© 2012 С.А. Хрусталеv¹, А.И. Орлов², В.Д. Шаров³

¹ Ульяновский государственный университет

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

³ Группа компаний “Волга-Днепр”, г. Москва

Поступила в редакцию 05.10.2012

Конечным продуктом разрабатываемой Автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий должна стать выработка управленческих решений, направленных на снижение риска авиационного происшествия и повышение безопасности полетов. В статье представлен один из подходов к формированию и оценке эффективности таких решений, который предполагается реализовать в системе.

Ключевые слова: безопасность полетов, риск авиационного происшествия, управленческое решение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий (АСППАП) разрабатывается совместно крупнейшим российским грузовым авиаперевозчиком – Группой компаний “Волга-Днепр” (ГрК) и Ульяновским государственным университетом (УлГУ) как инновационный проект в рамках Постановления №218 Правительства РФ от 09.04.2010. Главный научный консультант проекта – проф. МГТУ им. Н. Э Баумана А.И. Орлов. Работу исполнителей УлГУ, проектной группы ГрК и консультантов координирует Экспертный совет проекта под председательством член-корр. РАН Н.А. Махутова.

Одним из основных результатов работы АСППАП является перечень рекомендуемых управленческих решений (УР), направленных на повышение безопасности полетов (БП) авиакомпании (АК). Эффект от внедрения управленческих решений (УР), принимаемых с использованием системы, будет во многом определяться методологией и алгоритмом ее работы [1].

Алгоритм функционирования АСППАП в части оперативного анализа БП основан на расчете риска 12 основных типов авиационных со-

бытий (АС). Такими типами АС являются: столкновение в воздухе, выкатывание за пределы ВПП, пожар и др. Риск выражается характеристиками распределения ущерба от АС. На первом этапе разработки и опытной эксплуатации АСППАП используется упрощенный вариант расчета риска, как математического ожидания (среднего ожидаемого ущерба), равного произведению вероятности АС (рассчитывается по исходным данным о деятельности авиакомпании и статистике АС) и среднего ущерба (рассчитывается по данным страховых случаев с экспертным учетом опыта авиакомпании) [2, 3].

Вероятности АС рассчитываются на основе разработанных “деревьев развития АС” с использованием известных методов FMEA-и FTA [4].

В соответствии с экспертным решением в рамках АСППАП рассматриваются три горизонта (вида) прогнозирования: оперативный прогноз – риск “завтрашнего” полета, среднесрочный – риск для БП авиакомпании на предстоящий квартал и долгосрочный – риск на перспективу в 3 года.

Для каждого вида риска определены три уровня по “светофорному” принципу и методология принятия решений.

2. ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ НАБОРА УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Будущими пользователями системы признаю необходимым формирование базы данных рекомендаций по управленческим решениям в области обеспечения БП (БД УР) с предварительной оценкой их эффективности для всех трех видов риска. При очевидных особенностях формирования, внедрения и оценки эффективности УР “по факту” для разных видов риска,

Хрусталеv Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: shrustalev@mail.ru
Орлов Александр Иванович, доктор технических наук, доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, директор Института высоких статистических технологий и эконометрики. E-mail: prof-orlov@mail.ru

Шаров Валерий Дмитриевич, кандидат технических наук, заместитель директора Департамента предотвращения авиационных происшествий. E-mail: V.Sharov@Volga-Dnepr.com

методология предварительной оценки эффективности УР остается единой. В данной статье для конкретности изложения она описана применительно к оперативным рискам.

Ввиду сложности авиационно-транспортной системы, “деревья” моделей развития АС имеют большое количество “ветвей” и “листьев”. Общее количество инициирующих событий, ошибочных действий, условий и обстоятельств, других входных данных, расположенных на нижнем уровне деревьев АС и названных в АСПАП факторами опасности (ФО), составляет более 400. В конечном итоге, вероятность (возможность) возникновения АС определяется вероятностями соответствующих ФО.

Предполагаемые УР должны воздействовать на вероятности проявлений отдельных ФО. В ряде случаев оценка этих воздействий может быть получена на основе статистики (по опыту внедрения подобных УР) или технических характеристик (при модернизация воздушного судна). Но в большинстве случаев воздействие УР, принимаемых в авиакомпании, на ФО прогнозируется на основе экспертных оценок с использованием современных технологий [5]. Поскольку выполнить экспертное оценивание влияния каждого УР на каждый ФО не представляется возможным (в силу большого количества учитываемых ФО), принято решение выполнить “свертку” ФО, объединив их в укрупненные факторы опасности (УФО). При этом использована общепринятая для эргатических¹ систем трехкомпонентная модель “Человек-Машина-Среда”.

Ниже приведен список из 10 УФО для компоненты “Человек”, которая насчитывает с учетом дополнительных характеристик пилота 142 ФО.

1. Отклонения в технике пилотирования на взлете и наборе высоты.
2. Отклонения в технике пилотирования на снижении, заходе и посадке.
3. Ошибочные действия в особых ситуациях.
4. Нарушения стандартных эксплуатационных процедур.
5. Ошибки при анализе информации и принятии решений.
6. Недостатки взаимодействия в экипаже.
7. Усталость экипажа.
8. Недостатки взаимодействия “Экипаж-диспетчер ОВД”.
9. Ошибки при ТО самолета.
10. Ошибки при загрузке/разгрузке самолета.

Разработаны перечни УФО по компоненте “Машина” (насчитывается 11 УФО) и по компоненте “Среда” (9 УФО).

На основании опыта эксплуатационной деятельности авиакомпании, опросов руководителей и анализа результатов расследования АС составляется список УР, воздействующих на УФО – формируется БД УР. Затем выполняется экспертная оценка воздействия каждого УР на каждый УФО с использованием современных технологий экспертного оценивания [5]. В результате рассчитываются характеристики УР в виде снижения вероятности проявления УФО в данном полете (для оперативного прогноза) при внедрении данного УР.

Для перехода от уровня снижения вероятности проявлений УФО к показателям снижения вероятности проявлений ФО, которые используются непосредственно в вычислениях АСПАП, было проведено специальное исследование и предложены новые методика и алгоритм расчета.

3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Приведем математическое описание подхода к оценке эффективности УР, на основе которого строятся расчеты в АСПАП.

Пусть $T = \{T_j\}_{j=1..12}$ – множество рассматриваемых АС, представляющих собой случайные события, заданные на некотором вероятностном пространстве $(\Omega, \mathfrak{F}, P)$. Для каждого $T_j, j = 1, \dots, 12$ существует набор ФО: $A^j = \{A_i^j\}_{i=1..N_j}$, каждый из которых также является случайным событием.

Пусть на основе данных о предстоящем перелете (при оперативном прогнозировании) или усредненных эксплуатационных данных АК (при среднесрочном прогнозировании) рассчитаны вероятности всех ФО:

$$P(A_i^j) = p_{ij}, j = 1, \dots, 12, i = 1, \dots, N_j. \text{ Тогда вероятность каждого АС можно представить как некоторую функцию (вид зависит от структуры соответствующего дерева АС), аргументами которой являются вероятности ФО, то есть:}$$

$P(T^j) = P^j = f^j(p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{N_jj}), j = 1, \dots, 12, (1)$

При этом, для $\forall j = 1, \dots, 12$ функция $f^j(x_1, x_2, \dots, x_{N_j})$ является неубывающей по каждому аргументу, то есть для $\forall i = 1, \dots, N_j$ и для $\forall x < y$ выполняется неравенство

$$f^j(x_1, \dots, x_{i-1}, x, x_{i+1}, \dots, x_{N_j}) \leq f^j(x_1, \dots, x_{i-1}, y, x_{i+1}, \dots, x_{N_j}). (2)$$

Для расчета эффективности УР, наряду с анализом вероятностей возникновения АС, необходимо оценить и риски, связанные с предстоящим полетом (оперативный прогноз) или с эксплуа-

¹ Эргатическая система – система управления, одним из элементов которой является человек или группа людей.

тационной деятельностью АК за определенный период (среднесрочный прогноз). Риск, связанный с возникновением АС j -го типа, определяется по формуле

$$R^j = P^j S^j, \quad (3)$$

где P^j – вероятность возникновения АС, рассчитанная по формуле (1), S^j – величина среднего ущерба при наступлении АС j -го типа, определяемая на основе мировой статистики страховых выплат и статистике АСОБП РФ.

Интегральная оценка риска (и, соответственно, безопасности) предстоящего полета или эксплуатационной деятельности АК определяется суммой рисков по каждому АС:

$$R = \sum_{j=1}^{12} R^j. \quad (4)$$

Принимаемые в АК УР, направленные на повышение безопасности полетов, должны снижать уровень риска (4). К тому же каждое УР имеет некоторую стоимость. Поэтому, предполагаемая эффективность УР (набора УР) определяется величиной, на которую снижается вероятность АС (величина ущерба от АС остается неизменной) и стоимостью данного УР (набора УР).

Пусть $U = \{U_k\}_{k=1...M}$ – набор всех возможных УР для определенного варианта оперативного или среднесрочного прогноза. Каждое УР характеризуется следующими параметрами, оценка которых необходима для расчета эффективности: стоимостью (определяется финансовыми структурами АК на основе экономических методов), масштабом внедрения в рамках АК (представляет собой, например, долю личного состава, прошедшего повышение квалификации, долю парка воздушных судов АК, подвергшихся модернизации и т.д., и определяется руководителями, принимающими решения о внедрении УР), степенью влияния на ФО (определяется с помощью экспертного опроса). Масштаб внедрения УР представляется коэффициентом, значение которого принадлежит отрезку $[0;1]$. Пусть $C_k, k=1, \dots, M$ – стоимость УР U_k , а $q_{ij}^k, 0 \leq q_{ij}^k \leq 1, k=1, \dots, M, j=1, \dots, 12, i=1, \dots, N_j$ – доля, на которую уменьшится вероятность ФО A_i^j при внедрении УР U_k . Положим, что в дальнейших расчетах величины C_k и q_{ij}^k приводятся с учетом коэффициента внедряемости. Например, проведение некоторого УР U_k снижает вероятность проявления ФО A_i^j на 20% и планируется внедрение данного УР на 80% в рамках всей АК. Таким образом, величина $q_{ij}^k = 0.2 \cdot 0.8 = 0.16$, а вероятность ФО $P(A_i^j) = p_{ij}$ после внедрения УР $P(A_i^j | \text{принято УР } U_k) = p_{ij}(1 - q_{ij}^k)$. Следует

отметить, что многие величины q_{ij}^k будут равны нулю, что означает отсутствие влияния УР на соответствующий ФО (независимость событий U_k и A_i^j).

Если принимается набор УР $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}, k_l \in \{1, \dots, M\}$, то вероятность ФО определяется формулой:

$$P(A_i^j | \text{принят набор УР } \{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}) = p_{ij} \prod_{l=1}^m (1 - q_{ij}^{k_l}). \quad (5)$$

Вероятность каждого АС (см формулу (1)) с учетом принимаемого набора УР $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}, k_l \in \{1, \dots, M\}$, рассчитывается по формуле:

$$P^{*j} = P(T^j | \text{принят набор УР } \{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}) = f^j \left(p_{1j} \prod_{l=1}^m (1 - q_{1j}^{k_l}), p_{2j} \prod_{l=1}^m (1 - q_{2j}^{k_l}), \dots, p_{N_j} \prod_{l=1}^m (1 - q_{N_j}^{k_l}) \right) \quad (6)$$

Устраненный внедрением набора УР $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$ риск по каждому АС определяется соотношением:

$$\Delta R^j = (P^j - P^{*j}) S^j, \quad (7)$$

а общий устраненный риск будет равен:

$$\Delta R = \sum_{j=1}^{12} \Delta R^j. \quad (8)$$

С другой стороны стоимость набора УР $\{U_{k_1}, U_{k_2}, \dots, U_{k_m}\}$ составляет:

$$C = \sum_{l=1}^m C_{k_l}. \quad (9)$$

Рассчитав величины (8) и (9), определять эффективность УР (каждого в отдельности и набора в целом) можно используя как абсолютные критерии:

$$W_{абс} = \Delta R - C, \quad (10)$$

где $W_{абс}$ – абсолютный эффект от внедрения УР, так и относительные:

$$W_{отн} = \Delta R / C, \quad (11)$$

где $W_{отн}$ – устраненный с помощью УР риск за единицу вложенных средств.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НА ФАКТОРЫ ОПАСНОСТИ, ПО ИЗВЕСТНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭТОГО УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НА УКРУПНЕННЫЙ ФАКТОР ОПАСНОСТИ

На практике, при реализации описанного выше подхода к предварительной оценке эф-

фактивности УР, возникает очень объемная задача экспертного оценивания величин $q_{ij}^k, k = 1, \dots, M; j = 1, \dots, 12; i = 1, \dots, N_j$, представляющих собой долю, на которую уменьшится вероятность ФО A_i^j при внедрении УР U_k . Даже при невысоких значениях числа возможных УР (например, $M = 25$) и числа ФО в дереве АС (например, $N_j = 30$) количество оценок, которое необходимо получить от каждого эксперта будет равно $25 \times 30 \times 12 = 9000$, что, конечно же, отразится на качестве оценивания.

Для того чтобы избежать большого количества экспертных оценок похожие по смыслу ФО объединяются в УФО, число которых значительно меньше. В дальнейшем эксперты оценивают влияние УР на УФО. После чего возникает задача расчета величины влияния УР на ФО по известной (оцененной экспертами) величине влияния УР на УФО.

Каждый УФО $B_l^j, j = 1, \dots, 12, l = 1, \dots, L_j$ представляет собой объединение (сумму) независимых случайных событий (являющихся факторами опасности некоторого АС $T_j, j = 1 \dots 12$), заданных на вероятностном пространстве $(\Omega, \mathfrak{Z}, P)$: $B_l^j = A_{i_1}^j + A_{i_2}^j + \dots + A_{i_{b_l^j}}^j$,

где b_l^j – число ФО, объединением которых является УФО B_l^j . При этом каждый ФО содержится только в одном УФО. Далее рассмотрим подробнее произвольный УФО какого-либо АС.

Пусть УФО B (случайное событие на вероятностном пространстве $(\Omega, \mathfrak{Z}, P)$) является суммой n независимых ФО (также, являющихся случайными событиями): $B = A_1 + A_2 + \dots + A_n$. Обозначим вероятности данных событий следующим образом: $P(B) = p, P(A_i) = p_i, i = 1, \dots, n$. В силу независимости ФО получаем:

$$p = 1 - (1 - p_1) \dots (1 - p_n). \quad (12)$$

Пусть с помощью экспертного оценивания была получена величина $0 < q \leq 1$, являющаяся долей, на которую снижается вероятность УФО при внедрении определенного УР U :

$$P(B | \text{внедрение } U) = (1 - q)p. \quad (13)$$

Из (12) и (13) необходимо для каждого ФО $A_i, i = 1, \dots, n$ получить долю $0 \leq q_i \leq 1$, на которую снижается вероятность данного ФО при внедрении УР U (эффективность УР в отношении каждого ФО)

$$P(A_i | \text{внедрение } U) = (1 - q_i)p_i. \quad (14)$$

В основе алгоритма расчета величины влияния УР на ФО лежит предположение, согласно которому УР может вовсе не влиять на некоторые ФО, входящие в УФО, но на все оставшиеся ФО влияет одинаковым образом (обоснованность предположения проверена с помощью имитационного моделирования). Следуя этому пред-

положению, получаем (без ограничения общности): $q_i = 0, i = 1, \dots, m, q_i = Q, i = m + 1, \dots, n$. Обозначив $k = 1 - q$ и $x = 1 - Q$ из (12)-(14) вытекает:

$$kp = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)(1 - xp_{m+1})(1 - xp_{m+2}) \dots (1 - xp_n) = f(x) \quad (15)$$

Функция $f(x)$ из (15) является монотонно возрастающей на множестве $x \in [0; 1]$. Поэтому, при $m = 0$ (УР влияет на все ФО, входящие в УФО), уравнение (13) для $\forall k \in [0; 1]$ имеет единственное решение $f(x^*) = kp, x^* \in [0; 1]$, так как $f(0) = 0 \leq kp < p = f(1)$. Значение x^* (с учетом использованных выше обозначений) используется в пересчете вероятностей ФО при внедрении УР.

В случае, когда $0 < m < n$ (УР влияет не на все ФО, входящие в УФО), уравнение (13) будет иметь решение, если выполнено следующее условие:

$$k \geq \frac{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)}{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_n)} = \frac{1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \dots (1 - p_m)}{p}. \quad (16)$$

Следует отметить, что условие (16) является критерием корректности экспертного оценивания коэффициента k (экспертно оценивается параметр q , но $k = 1 - q$). Например, неправильно утверждать, что некоторое УР на 90% сокращает вероятность УФО (соответственно $k = 0.1$), состоящего из десяти ФО, если данное УР вообще не влияет на половину ФО, входящих в УФО. Поэтому, в случае невыполнения условия (16) в некотором расчете вероятностей ФО, необходимо брать такое значение $x^* \in [0; 1]$, при котором $f(x^*)$ было максимально близко к kp , то есть $x^* = 0$.

Обобщая два рассмотренных случая, можно записать решение задачи нахождения величины влияния УР на ФО по известному показателю влияния УР на УФО (см (12)-(15)) следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, m \\ 1 - \arg \min_{x \in [0; 1]} |f(x) - kp|, & i = m + 1, \dots, n. \end{cases} \quad (17)$$

Отдельно стоит рассмотреть ситуацию, когда вероятности ФО $p_i, i = 1, \dots, n$ достаточно малы (в области применения АСПАП таких ситуаций большинство). В этом случае вероятность УФО в (12) можно оценить следующим образом:

$$p \approx \sum_{i=1}^n p_i, \quad (18)$$

а уравнение (15) примет вид:

$$kp \approx \sum_{i=1}^m p_i + x \sum_{i=m+1}^n p_i . \quad (19)$$

Таким образом, при малых значениях вероятностей ФО, решение задачи нахождения величины влияния УР на ФО по известному показателю влияния УР на УФО выглядит следующим образом:

$$q_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \dots, m \\ \min \left\{ \frac{pq}{\sum_{i=m+1}^n p_i}; 1 \right\}, & i = m + 1, \dots, n \end{cases}, \quad (19)$$

где p определяется по формуле (18).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.И. Влияние методологии на последствия принятия решений. – Материалы I Международного Конгресса по контроллингу: выпуск №1 / Под науч. ред. С.Г. Фалько. М.: НП “ОК”, 2011. С.86-90.
2. Бутов А.А., Орлов А.И., Сирота В.В., Шаров В.Д. Принятие решений при разработке системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Теория активных систем: Труды международной научно-практической конференции (14-16 ноября 2011 г., Москва, Россия). Том I. Общая редакция – В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. М.: ИПУ РАН, 2011. С.112-115.
3. Орлов А.И., Рухлинский В.М., Шаров В.Д. Экономическая оценка рисков при управлении безопасностью полетов // Материалы I Международной конференции “Стратегическое управление и контроллинг в некоммерческих и публичных организациях: фонды, университеты, муниципалитеты, ассоциации и партнерства”: выпуск №1 / Под научн. ред. С.Л. Байдакова и С.Г. Фалько. М.: НП “ОК”, 2011. С. 108-114.
4. Шаров В.Д., Макаров В.П. FMEA-FTA методология построения дерева развития авиационного события // Научный вестник МГТУ Гражданской Авиации, 2011. № 174. С.18-24.
5. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: Ч.2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 486 с.

ASSESSMENT OF MANAGEMENT DECISIONS EFFECTIVENESS IN THE AUTOMATED SYSTEM OF AVIATION ACCIDENTS FORECASTING AND PREVENTION

© 2012 S.A. Khrustalev¹, A.I. Orlov², V.D.Sharov³

¹ Ulyanovsk State University

² Bauman Moscow State Technical University

³ Volga-Dnepr Group, Moscow

Development of management decisions for safety risk mitigation is the final objective of the automated system of aviation accidents forecasting and prevention The article devoted to one of possible approaches for assessment of effectiveness of these decisions.

keywords: flight safety, risk of the aviation accident, management decision.

Sergey Khrustalev, PhD.Math., Associate Professor.

E-mail: shrustalev@mail.ru

Alexander Orlov, Dr.Sci.Tech., Dr.Sci.Econ., PhD.Math., Professor, the Head of Institute of High Statistical Technologies and Econometrics.

E-mail: prof-orlov@mail.ru

Valery Sharov, PhD.Tech., Deputy Director of Aviation Accident Prevention Department.

E-mail: V.Sharov@Volga-Dnepr.com