

# Управление в технических системах

© 2021 г. В.В. ВОРОБЬЕВ, д-р техн. наук (v.vorobjev@mstuca.aero),  
В.Л. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук (v.kuznetsov@mstuca.aero),  
В.Д. ШАРОВ, д-р техн. наук (v.sharov@mstuca.aero)  
(Московский государственный технический университет гражданской авиации)

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ АЗН-В

В документе Радиотехнической комиссии по аэронавтике (RTCA) [1] разработана методика оценки уровня безопасности полетов при использовании перспективной системы автоматического зависимого наблюдения в вещательном режиме (АЗН-В), предназначенная для сертификации системы управления воздушным движением. Как показал приведенный в статье анализ, в основе этой методики лежит ошибочная гипотеза, использование которой приводит к заниженным требованиям к сертифицируемой системе АЗН-В. В рассмотренном в статье примере показано, что отказ от этой ошибочной гипотезы может приводить к ужесточению требований на порядок. Для получения корректных результатов в статье предложена простая для расчетов модификация методики, лишенная этого, вообще говоря, серьезного недостатка. Использование предложенной методики проиллюстрировано на примере.

*Ключевые слова:* АЗН-В, оценка уровня безопасности полетов, фактор опасности, целевой уровень безопасности, вероятность авиационного происшествия.

**DOI:** 10.31857/S0005231021080067

### 1. Введение

Разрабатываемый Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) переход на принципиально новую систему обслуживания воздушного движения (ОВД), связанную с использованием спутниковых систем, новых самолетных ответчиков и радиолокационной информации, должен начаться в США и в Европе уже в этом году [2, 3]. В его основе лежит принцип совместной ситуационной осведомленности, когда информация о координатах и скоростях воздушных судов (ВС) доступна не только наземным службам, но и каждому участнику воздушного движения (ВД). Общие положения, определяющие требования к этой новой системе ОВД, сформулированы в циркуляре ИКАО [4]. Появлению этого документа предшествовала большая работа, связанная с подготовкой и разработкой моделей, позволяющих оценить надежность, эффективность и безопасность вводимых новых технологий.

Так, например, оперативной группой, созданной при сотрудничестве Евроконтроля и Радиотехнической комиссии по аэронавтике (*Radio Technical*

*Commission for Aeronautics — RTCA*), был опубликован объемный документ, определяющий требования к системе АЗН-В в зоне радарного покрытия [1]. Во всех сценариях, рассмотренных в этом документе, АЗН-В используется как основной источник информации при наблюдении за воздушной обстановкой, а радар выступает как резервный источник, используемый лишь во время потери или ухудшения данных, поступающих от АЗН-В. Кроме того, результаты радиолокационных измерений используются с целью проверки согласованности данных двух систем наблюдения.

Аналогичная работа проводится и в Российской Федерации. Реализуются пилотные проекты в укрупненных центрах Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) [5–7], а в апреле 2018 г. была утверждена Концепция внедрения автоматического зависимого наблюдения на основе единого стандарта с развитием до функционала многопозиционных систем наблюдения [8], начали реализовываться пилотные проекты в укрупненных центрах ЕС ОрВД.

Требования, предъявляемые к оценке состояния безопасности системы наблюдения ОВД при использовании системы АЗН-В, изложены в [4]. Однако в этом документе концепция оценки представлена только в общих чертах. Поэтому за основу, как правило, берется методика, разработанная и опубликованная в [1]. Она была апробирована авиационными агентствами Австралии и США, и включает в себя оценки эксплуатационных рисков и разработку, и реализацию мер по их снижению до приемлемого уровня.

В большинстве последующих работ [9–12], посвященных этой тематике, рассматривались вопросы, связанные в основном с построением и анализом дерева отказов.

Так, в [9] дается обзор существующих методов оценки безопасности полетов с использованием АЗН-В, отмечаются их слабые стороны и предлагается свой метод, основанный на анализе дерева отказов. В [10] представлен обстоятельный обзор подходов к задаче построения дерева отказов. Работы [11–13] также посвящены этой теме. Тот факт, что анализ дерева событий ускользает от внимания исследователей, объясняется его относительной простотой в сравнении с существенно более сложной задачей построения дерева отказов. Видимо, этим обстоятельством объясняется отсутствие работ, посвященных анализу дерева событий и вскрывающих гипотезу, лежащую «на поверхности» и заложенную неявно в алгоритм RTCA.

Подчеркнем здесь еще раз, что принятие этой, вообще говоря, ошибочной гипотезы приводит к неоправданно заниженным требованиям методики RTCA к уровню безопасности полетов ВС. В этой статье анализируется общая методика, представленная в [1], выделяется отмеченная латентная гипотеза и предлагается относительно несложно реализуемая модернизация, лишенная отмеченного серьезного недостатка.

## 2. Латентная гипотеза в методике RTCA

Система АЗН-В представляет достаточно сложную структуру, для построения математической модели, которой в [1] выдвинуто большое количество технических гипотез, перечисление и обсуждение которых занимает зна-

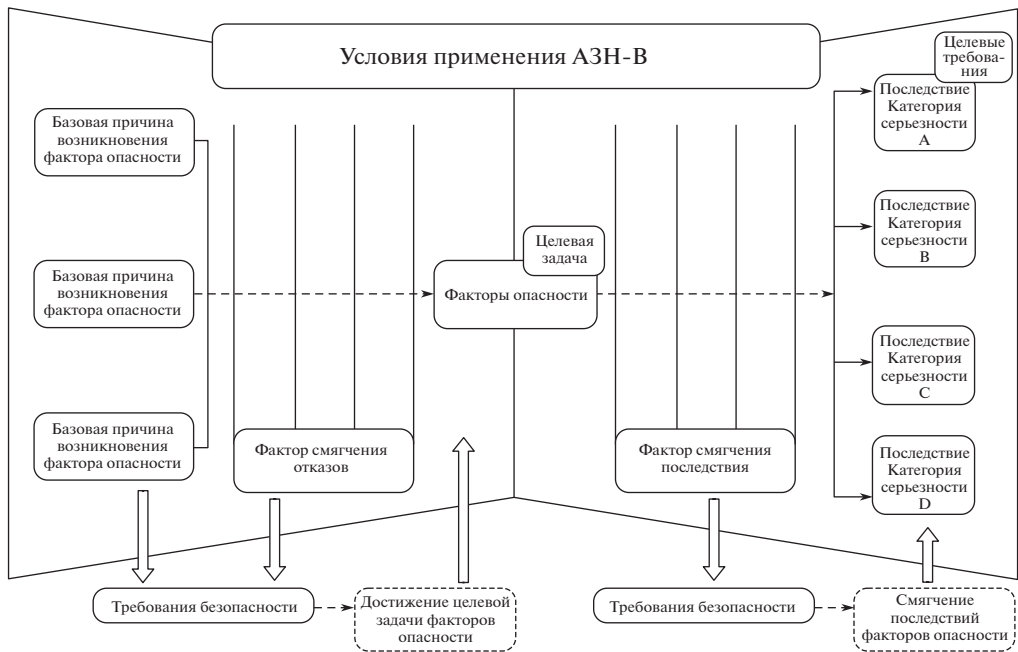


Иллюстрация к методике оценки состояния безопасности.

чительную долю объема разработанного документа. Принимая их, отметим здесь еще некоторые моменты, которые ускользнули от внимания разработчиков этого фундаментального документа. Принимаемые в методике гипотезы важны, поскольку сделанные допущения являются ключевым вкладом в работу по определению требований к системе АЗН-В. Они обеспечивают основу адекватности рассматриваемой модели, и должны быть тщательно проанализированы. Отметим, что все требования к системе наблюдения, полученные в результате проводимого анализа, адекватны лишь тогда, когда вся совокупность принятых допущений выполняется. Поэтому любая ситуация, которая не вписывается в систему принятых гипотез, может быть охарактеризована иной совокупностью требований. Такие отклонения должны учитываться при проведении анализа конкретных систем.

Рассмотрим подробнее общую схему используемой методики, базирующейся на подходе вероятностной оценки безопасности. В основе методики лежит выделение некоторых совокупностей состояний системы, именуемых в соответствии со сложившейся практикой факторами опасности ( $\Phi O$ ), с которыми могут столкнуться экипаж ВС и наземные службы. В [1] выделено 21 такое состояние. Далее, для каждого  $\Phi O$  строится дерево событий, описывающее все возможные последствия с указанием вероятностей реализации соответствующих ветвей и тяжести последствий, а также дерево отказов, приводящих к этому  $\Phi O$ . Таким образом, проводится декомпозиция исходной задачи. Она распадается на 21 идейно близкую задачу существенно меньшей сложности. На рисунке представлен один из компонентов такой декомпозиции.

Математическая модель оценки риска негативных последствий отказов оборудования является дискретной стохастической моделью системы наблюдения ОВД, включающей два сегмента (наземный и бортовой), в которой

может реализовываться множество различных цепочек событий (реализаций случайного процесса).

Создание такой модели означает формирование всего множества возможных цепочек событий, начинающихся с возникновения отказа и заканчивающихся конкретным негативным исходом, с указанием вероятности реализации каждой такой цепочки.

Очевидно, что мощность такого множества (число различных цепочек) слишком велика для того, чтобы указанный выше подход к числовому описанию риска негативных последствий отказов мог быть реализован при внедрении АЗН-В в регионах. Поэтому в [1] был реализован упрощенный подход, базирующийся на утверждении о существовании состояний системы наблюдения ОВД, обладающих марковским свойством.

Гипотеза о марковости выглядит в приложении к рассматриваемой задаче следующим образом: если наступление  $\Phi O$  зафиксировано, то вероятности сценариев развития дальнейших событий не зависят от того, в результате какого конкретно отказа возник этот  $\Phi O$ .

Таким образом, все цепочки событий оказываются разбитыми на отдельные группы, объединяемые одним признаком — наличием события, именуемого  $\Phi O$ . Очевидно, что число таких групп будет равно числу выделенных экспертами различных факторов опасности. Это, с одной стороны, позволяет существенно уменьшить множество различных сценариев развития событий (поскольку каждый раз рассматривается лишь один  $\Phi O$ ), а с другой стороны, упрощает расчет вероятности реализации того или иного сценария.

Последнее становится понятным из следующего представления модели. Пусть  $\{a_i\} = A$  — множество различных так называемых базовых причин (отказов техники) возникновения негативных для ОВД последствий,  $\{\Phi O_j\}$  — множество различных факторов опасности, а  $\{b_k\} = B$  — множество негативных исходов, порожденных различными сценариями развития событий. Тогда вероятность появления какого-либо конечного негативного события  $b_k \in B$  может быть оценена следующим образом:

$$(1) \quad P(b_k) = \sum_j \sum_i P(a_i, \Phi O_j, b_k) = \sum_j \sum_i P(b_k | \Phi O_j, a_i) \cdot P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i).$$

Здесь  $P(a_i, \Phi O_j, b_k)$  — вероятность реализации одной из возможных цепочек развития событий.

В случае справедливости марковской гипотезы для  $\Phi O_j$  получаем

$$P(b_k | \Phi O_j, a_i) = P(b_k | \Phi O_j).$$

Здесь учтено, что события  $a_i$  (отказы) порождают  $\Phi O_j$ , т.е. предшествуют во времени его наступлению. Тогда выражение для вероятности появления конечного негативного исхода  $b_k$  (соотношение (1)) может быть записано в виде

$$(2) \quad P(b_k) = \sum_j P(b_k | \Phi O_j) \sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i) = \sum_j P(b_k | \Phi O_j) P(\Phi O_j).$$

Далее следует сформулировать гипотезу методики [1], которая в руководстве явно не выписана, но с необходимостью следует из алгоритма дальнейших предлагаемых расчетов.

*Гипотеза.* Будем полагать, что множество  $\{\Phi O_j\}$  выбрано так, что сценарий, завершающийся событием  $b_k$ , может быть порожден при реализации лишь одного  $\Phi O$ , например  $\Phi O_j$ .

При выполнении этой гипотезы первое суммирование в (3) можно опустить.

Возвращаясь к основным положениям методики [1] получаем, что вероятность  $P(b_k)$  может быть рассчитана как произведение вероятностей

$$(3) \quad P(b_k) = P(b_k | \Phi O_j) \cdot \left( \sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i) \right).$$

Второй множитель в (3) описывает вероятность появления конкретного  $\Phi O$ , получаемого из анализа дерева отказов, а первый – вероятность наступления события  $b_k$  при условии, что  $\Phi O_j$  зафиксирован – из дерева событий.

Под риском неблагоприятного исхода  $b_k$  понимают упорядоченную пару  $\{P(b_k), C(b_k)\}$ , объединяющую как вероятность исхода  $P(b_k)$ , так и функцию штрафа или оценку тяжести последствий этого исхода –  $C(b_k)$ .

Экспертами для каждого  $b_k$  выставляется функция штрафа  $C(b_k)$ , которую принято называть категорией серьезности последствия. Каждой категории серьезности поставлена в соответствии допустимая (приемлемая) частота ее (категории) появления или, что то же самое, максимально допустимая вероятность события –  $P_{\max}(b_k)$  [14].

Для того чтобы риск был признан приемлемым, необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$(4) \quad P_{\max}(b_k) \geq P(b_k),$$

где  $P(b_k)$  определено в (3). Поэтому  $P_{\max}(b_k)$  обозначают в [1] как «целевое требование».

В случае, если неравенство (4) не выполняется, необходимо принимать дополнительные меры, направленные, например, на повышение надежности аппаратуры бортового или наземного сегментов АЗН-В.

Поскольку одному  $\Phi O$ , как правило, соответствует несколько различных сценариев развития событий, то необходимо выбрать «худший» и убедиться в том, что для него тем не менее неравенство (4) выполняется.

В предложенной в [1] методике этот вопрос решается следующим образом. Вводится понятие «целевая задача», которая определяется как величина максимально допустимого значения вероятности появления  $j$ -го фактора опасности  $P_{\text{целевая}}^j$ . Поскольку, однако, требования ИКАО накладывают ограничения на вероятности появления опасных событий  $b_k$ , а не  $\Phi O$ , возникает необходимость выразить  $P_{\text{целевая}}^j$  через определенные ИКАО ограничения –

величины  $P_{\max}(b_k)$ :

$$P_{\text{целевая}}^j = \min_k \left[ \frac{P_{\max}(b_k)}{P(b_k | \Phi O_j)} \right],$$

рассматривая при этом «наихудший» вариант, соответствующий наименьшей вероятности. Вероятность реального появления  $\Phi O_j$ , полученная на основании данных дерева отказов,  $P(\Phi O_j) = (\sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i))$  не должна превышать  $P_{\text{целевая}}^j$ , т.е. должно выполняться условие:

$$(5) \quad \min_k \left[ \frac{P_{\max}(b_k)}{P(b_k | \Phi O_j)} \right] \geq \left( \sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i) \right).$$

Если неравенство (5) не выполняется, то необходимо вводить новые демпфирующие барьеры.

Далее покажем, что в случае невыполнения отмеченной выше гипотезы проверка условия (5), да и просто введение целевой задачи указанным способом, приведет к заниженным требованиям к уровню безопасности.

### 3. Коррекция алгоритма RTCA

В случае отказа от гипотезы реализации единственного  $\Phi O$  суммирование по  $j$  в (3) не может быть отброшено, и соотношение (3), а также следующие за ним уравнения становятся несправедливыми. Ошибочным становится также и приведенное в [1] выражение (5) для определения целевой задачи.

Проиллюстрируем ограниченность обсуждаемой гипотезы на примере события  $b_k$  – нарушению норм эшелонирования в контролируемом воздушном пространстве, относящегося к первой группе событий, характеризующей наибольшей тяжестью последствий. Рассмотрим  $\Phi O_1$  (в [1] обозначено как ОН01) – «Внезапное пропадание информации АЗН-В о местоположении одного ВС», и  $\Phi O_2$  (ОН02) – «Внезапное пропадание информации АЗН-В о местоположении нескольких ВС». И тот, и другой  $\Phi O$  ведут к невозможности обеспечить соблюдение установленных норм эшелонирования в целом – к одному событию  $b_k$ . Отметим, что в соответствии с таблицей C-19a Summary of Safety Objectives per Hazard, приведенной в [1], к столкновению могут привести и проявления девяти других  $\Phi O$ , а именно: ОН03, 04, 05 case2, 07, 08, 11, 12, 15, 16 case2.

Таким образом, в сумме по  $j$  в исходном соотношении (3) может стоять 11 слагаемых, каждое из которых заведомо больше нуля, и переход к соотношению (3) оказывается некорректен.

Система АЗН-В удовлетворяет требованиям безопасности полетов, если вероятность любого события  $b_k$  будет меньше величины приемлемого риска –  $P_{\max}(b_k)$ , определенного в [14]. Но тогда, в соответствии с (3), можно записать

$$(6) \quad P_{\max}(b_k) = \sum_{j=1}^m P_{\max}^j(b_k),$$

где  $P_{\max}^j(b_k)$  – парциальный приемлемый риск наступления события  $b_k$ , вызванного  $j$ -м фактором опасности,  $m$  – количество соответствующих факторов. В рассмотренном примере  $m = 11$ . Отсюда нетрудно видеть, что из перечисленного множества  $\Phi O$  найдется, по крайней мере, один фактор, при появлении которого приемлемый риск должен быть на порядок меньше, чем  $P_{\max}(b_k)$ .

Таким образом, если стремиться сохранить методикау RTCA, то в условии (5) величину  $P_{\max}(b_k)$  необходимо заменить вероятностью  $P_{\max}^j(b_k)$ , которая для некоторых  $\Phi O$  в рассмотренном в статье примере может быть на порядок меньше, чем приемлемый уровень:

$$(7) \quad \min_k \left[ \frac{P_{\max}^j(b_k)}{P(b_k | \Phi O_j)} \right] = P_{\text{целевая}}^j \geq \left( \sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i) \right).$$

Из (7) следует, что найдутся такие  $\Phi O$ , целевая задача для которых будет на порядок «жестче», чем рассчитанная по методике RTCA [1].

Приведенный анализ показывает, что рассматриваемая методика дает некорректные оценки уровня безопасности системы АЗН-В. Получить адекватные результаты возможно лишь при заданном множестве приемлемых вероятностей  $\left\{ P_{\max}^j(b_k) \right\} j = 1, \dots, m$  появления события  $b_k$  как следствия наступления  $j$ -го  $\Phi O$ .

К сожалению, такой простой способ модификации алгоритма не может быть реализован, поскольку ограничения накладываются на всю сумму (6), а не на ее отдельные члены. Поэтому предлагается следящая модификация методики оценки уровня безопасности АЗН-В.

В соотношении (7) для каждого  $j$  и выбранного для оценки  $b_k$  заменяем знак неравенства на знак равенства:

$$(8) \quad \left[ \frac{P_{\max}^j(b_k)}{P(b_k | \Phi O_j)} \right] = \left( \sum_i P(\Phi O_j | a_i) \cdot P(a_i) \right) = P(\Phi O_j)$$

и рассматриваем его как уравнение для неизвестной величины  $P_{\max}^j(b_k)$ . Если бы числовое значение  $P_{\max}^j(b_k)$  было известно, то соотношение (8) можно было бы рассматривать как предельное условие выполнимости (7).

Полученные из (8) значения парциальных приемлемых рисков  $P_{\max}^j(b_k)$  суммируем (в соответствии с соотношением (6)) по всем  $j$ , для которых за наступлением  $\Phi O_j$  следует событие  $b_k$ . Далее, если полученная сумма не превысит установленный в [14] приемлемый риск  $P_{\max}(b_k)$ , то сертифицируемая система АЗН-В соответствует предъявляемым требованиям безопасности, в противном случае необходимо установление дополнительных демпфирующих барьеров.

Проиллюстрируем результаты на рассмотренном ранее примере.

В таблице приведены результаты расчетов по модифицированной методике для события первой группы по классу серьезности последствия (потеря эшелонирования), полученные на основании данных [1].

Таблица

Фактор опасности	$P(\Phi O_j)$	Дерево событий	Сценарий уровня 1 (Cat.1), описание события	Вероятность	Сумма	$P_{\max}^j(b_k)E + 9$
1	2	3	4	5	6	7
ОН01	2.43 E-04	Figure C-9: ОН01	15 – Полная потеря эшелонирования	3.00E-09	3.1 E-9	7.5 E-4
			17 – Аналогично сцен. 15	1.00E-10		
ОН02	5.854 E-05	Figure C-11: ОН02	14 – Полная потеря эшелонирования	3.00E-05	3.1 E-5	1,8
			16 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-06		
ОН03	2.030 E-04	Figure C-13: ОН03	10 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-06	2.0 E-6	0,4
			12 – Аналогично сцен. 10	1.00E-06		
			16 – Полная потеря эшелонирования	3.00E-09		
ОН04	6.024 E-05	Figure C-15: ОН04	14 – Полная потеря эшелонирования	3.00E-05	3.1 E-5	1,9
			1 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-06		
ОН05 case 2	2.34 E-08	Figure C-18: ОН05 Case 2 <i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	11 – Потенциальное столкновение	9.17E-05	2.1 E-4	4.9 E-3
			14 – Аналогично сцен. 11	9.20E-05		
			11a – Аналогично сцен. 11	2.76E-05		
			14a – Аналогично сцен. 14	9.20E-07		
ОН07	1.34 E-08	Figure C-29: ОН07 <i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	3 – Возможное столкновение с ВС или с землей	9.87E-03	3.0 E-2	0,4
			7 – Аналогично сцен. 3	9.90E-03		
			9 – Аналогично сцен. 3	1.00E-02		
			11 – Аналогично сцен. 3	1E-06		



Таблица (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
ОН08	1.34 E-08	Figure C-31: ОН08 <i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	12 – Аналогично сцен. 3 Сцен. 3: Значительное снижение запаса безопасности и возможностей системы УВД	1.00E-06	1.0 E-6	1.3 E-5
ОН11	1.34 E-08	Figure C-35: ОН11	6 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-06	1.3 E-5	1.7 E-4
		<i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	13 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-08		
			17 – Потенциально полная потеря эшелонирования	2.94E-06		
			20 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-10		
ОН12	3.40 E-06	Figure C-37: ОН12	6 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-06	1.3 E-5	0.04
		<i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	13 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-08		
			17 – Потенциально полная потеря эшелонирования	2.94E-06		
			20 – Потенциально полная потеря эшелонирования	9.51E-10		
ОН15	1.34 E-05	Figure C-43: ОН15	4 – Потенциально полная потеря эшелонирования	5.00E-07	5.1 E-7	6.8 E-3
		<i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	10 – Потенциально полная потеря эшелонирования	5.00E-09		
			12 – Потенциально полная потеря эшелонирования	5.00E-11		
			20 – Потенциально полная потеря эшелонирования	5.00E-11		
ОН16 case 2	3.40 E-06	Figure C-46: ОН16 case 2	1 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-03	1.0 E-3	3,4
		<i>Если наземный радиолокатор не работает</i>	4 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-05		
			6 – Полная потеря эшелонирования	1.00E-07		

В таблице рассмотрены ветви деревьев, приводящие к потере эшелонирования, относящейся к первой группе событий, характеризуемой наибольшей тяжестью последствий. Значения, стоящие в столбцах  $P(\Phi O_j)$ ,  $P(b_k | \Phi O_j)$ , взяты из [1]. Для получения значений столбца  $P_{\max}^J(b_k)$  использовались уравнение (8) и свойство несовместности ветвей дерева событий, приводящих к анализируемому исходу. В результате суммирования значений последнего столбца (в соответствии с (6)) получили вероятность  $P(b_k) = 7,9 \cdot 10^{-9}$  потери эшелонирования.

#### 4. Заключение

В представленной работе обращено внимание на не вполне корректную гипотезу, использованную, но не проанализированную, в методике [1]. Ее суть заключается в том, что каждое конечное событие может порождаться только одним фактором опасности. Именно благодаря предположению о справедливости этой гипотезы в методике RTCA удается преобразовать (3), положив в последней сумме все члены, кроме одного, равными нулю. В работе показано, что в общем случае гипотеза не верна, и результаты, полученные при ее использовании, приводят к ослаблению требований безопасности полетов, предъявляемых к сертифицируемой системе.

Скорректировать методику можно было бы, используя соотношение (7), однако парциальная приемлемая вероятность  $P_{\max}^J(b_k)$  — максимально допустимая вероятность появления исследуемого конечного события в результате наступления одного конкретного фактора опасности, не определена. Задаются лишь ограничения на суммарную вероятность, которая определяется допустимым риском.

В предлагаемой модификации метода расчета безопасности полетов с использованием системы АЗН-В этот сложный момент обходится следующим образом.

Из соотношения (8) для каждого  $\Phi O$  находятся значения, претендующие на парциальные приемлемые риски. Если их сумма будет меньше или равна установленному приемлемому риску, то эти претензии обоснованы, и сама сертифицируемая система АЗН-В удовлетворяет предъявляемым требованиям. В случае отрицательного результата необходима доработка системы, направленная на повышение надежности аппаратуры, или пересмотр барьеров безопасности. После этой работы с барьерами указанный алгоритм должен быть продолжен до тех пор, пока положительный результат не будет достигнут. Разработка и внедрение барьеров безопасности для снижения риска авиационных происшествий при ОВД соответствует требованиям Стандартов ИКАО к системам управления безопасностью полетов на государственном и корпоративном уровнях [15, 16].

В иллюстративном примере, рассмотренном в работе, в качестве конечного события  $b_k$  было проанализировано состояние первой группы по классу серьезности последствий, соответствующее потере эшелонирования в системе. Для приведенных в [1] данных значение вероятности такого события, согласно модифицированной методике, составляет  $P(b_k) = 7.9 \cdot 10^{-9}$  на час полета одного ВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Enhanced Air Traffic Services in Radar-Controlled Areas Using ADS-B Surveillance (ADS-B-RAD). – RTCA DO-318, 2009.
2. Electronic Code of Federal Regulations e-CFR data is current as of April 10, 2020. [Эл. ресурс. Режим доступа: <https://www.faa.gov/TV/?mediaId=1793> Дата обращения 10.04.2020].
3. *Law J.* European ADS-B Regulation, ADS-B Workshop – SP/22. [Эл. ресурс. Режим доступа: <https://www.icao.int/APAC/Meetings/2010/adsb/sp22.pdf> Дата обращения 18.04.2020].
4. Оценка наблюдения с использованием систем АЗН-В и мультилатерации в целях обеспечения обслуживания воздушного движения и рекомендации по их внедрению. – Циркуляр ИКАО 326-AN/188, 2013.
5. *Алипов И.В.* Проблемы внедрения вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) в Российской Федерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. № 7. 2015. С. 86–92.
6. *Дупиков В.В., Тараканов А.А.* Анализ оснащённости воздушных судов оборудованием АЗН-В в Московской зоне ЕС ОрВД // Научный вестник ГосНИИ ГА. № 7. 2015. С. 93–99.
7. *Кузнецов В.Л., Дупиков В.В.* Аналитическая модель радарного мониторинга целостности информации АЗН-В // Научный Вестник МГТУ ГА. № 220. 2015. С. 64–72.
8. «Концепции внедрения автоматического зависимого наблюдения на основе единого стандарта с развитием до функционала многопозиционных систем наблюдения», утверждена Минтрансом РФ в 2018 г. М., 2018.
9. *Ali B.S., Ochieng W., Majumdar A., Schuster W., Chiew T.K.* Safety assessment framework for the Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) system // Elsevier Safety Sci. 2015. No. 78. P. 91–100.
10. *Kabir S.* An overview of fault tree analysis and its application in model based dependability analysis // Elsevier, Expert Syst. Appl. 2017. No. 77. P. 114–135.
11. *Olaganathan Rajeev* Safety Analysis of Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) System // Int. Y. Aerospace Mechanical Engineering. 2018. V. 5. No. 2. P. 9–18.
12. *Ali B.S., Ochieng W.Y., Majumdar A.* ADS-B: Probabilistic safety assessment // J. Navig. 2017. No. 70. P. 887–906.
13. *Tabassum A., Sabatini R., Gardi A.* Probabilistic Safety Assessment for UAS Separation Assurance and Collision Avoidance Systems // Aerospace. 2019. No. 6. P. 19–39.
14. Руководство по системе управления безопасностью полетов при АНО. ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», 2014.
15. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов. ИКАО, 2-е изд., 2016.
16. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Дос.9859. ИКАО, 4-е изд., 2018.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Ф. Караваем.*

Поступила в редакцию 14.05.2020

После доработки 03.02.2021

Принята к публикации 16.03.2021