

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРЕРВАННОЙ ПОСАДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВЫВОДА НА ОСНОВЕ ПРЕЦЕДЕНТОВ

Б.Е. Федунцов (*boris_fed@gosniias.ru*)^A
А.А. Липатов (*alexey.lipatov75@mail.ru*)^A

^A ФАУ «ГосНИИАС», Москва

В докладе представлены фрагменты базы знаний бортовой оперативно советующей экспертной системы, предназначенной для поддержки принятия решений экипажем самолёта в ситуации прерванной посадки. Система должна выдавать рекомендации об уходе на второй круг и повторной попытке посадки или уходе на запасной аэродром на основании анализа причин, приведших к прерыванию посадки. Содержимое базы знаний формируется за счёт накопления опыта успешного принятия и реализации подобных решений, формализованного с помощью метода вывода на основе прецедентов. Разработан прототип экспертной системы, в котором для принятия решений используются признаки, характеризующие метеоусловия (скорость попутного ветра), состояние взлётно-посадочной полосы (коэффициент сцепления) и характер движения самолёта при неудачной попытке посадки (установившееся продольное ускорение). Приведён пример работы системы.

Ключевые слова: этап посадки самолёта, поддержка принятия решений, база знаний, процедуры базы знаний, рекомендации экипажу, вывод на основе прецедентов.

Введение

Посадка самолёта является одним из наиболее сложных этапов полёта, связанным с высоким риском авиационных происшествий. Значительную часть среди этих происшествий составляют случаи выкатывания самолётов за пределы взлётно-посадочной полосы (ВПП). В целом, к группе авиационных происшествий, связанных с безопасностью на ВПП, за период с 2016 по 2020 г. относились 53% авиационных происшествий и 41% катастроф, на которые пришлось 20% погибших от общего числа жертв авиационных катастроф [Анализ, 2021]. Существенный вклад в эту группу

происшествий вносят выкатывания. Исследователи отмечают различные причины выкатывания за пределы ВПП [Мозоляко, 2014], которые можно разделить на несколько групп:

- ошибки пилотирования;
- неблагоприятные метеоусловия (сдвиг ветра, попутный ветер, боковой ветер);
- неблагоприятное состояние ВПП (залитая водой, заснеженная, обледенелая), приводящее к снижению коэффициента сцепления колёс самолёта с ВПП;
- снижение эффективности или отказ устройств торможения;
- несвоевременное принятие экипажем решений об уходе на второй круг или запасной аэродром.

Предотвращению выкатываний уделяется большое внимание в рамках деятельности, направленной на повышение безопасности полётов [Государственная политика, 2017, EPAS, 2024]. Для достижения этой цели принимаются меры организационного и технического характера. Организационные меры направлены на исключение предпосылок для выкатывания и главным образом включают в себя повышение уровня подготовки пилотов и совершенствование технологии работы экипажей. Технические меры заключаются в разработке систем, обеспечивающих ситуационную осведомлённость экипажа о положении самолёта на ВПП и предупреждение о возникшей опасности выкатывания, а также бортовых оперативно-советующих систем, предоставляющих экипажу рекомендации по действиям в такой ситуации [Мозоляко, 2014], [Бородкин, 2023].

Системы осведомлённости и предупреждения об опасности выкатывания за пределы ВПП – Runway Overrun Alerting and Awareness System (ROAAS) – предназначены для снижения риска выкатывания во время посадки путём обеспечения своевременного и чёткого предупреждения лётного экипажа о нехватке остающейся длины ВПП для остановки самолёта [Georges, 2017]. К данному классу относятся такие системы, как Runway Awareness and Advisory System (RAAS) корпорации Honeywell Aerospace, США [Product Description, 2009], Runway Overrun Prevention System (ROPS) корпорации Airbus [Safety Innovation, 2022], Runway Situation Awareness Tool (RSAT) компании Boeing [Goodwill, 2014] и др. В нашей стране так же ведутся разработки в этой области, примеры которых представлены в работах [Коконцева, 2025], [Методика, 2022], [Аспидова, 2022], [Юневич, 2024].

Анализ причин выкатывания самолётов за пределы ВПП, способов и средств предупреждения таких событий и минимизации их последствий показывает, что основную роль в этом играет своевременное принятие экипажем решений об использовании средств торможения или прерывании посадки с последующим уходом на второй круг или запасной аэро-

дром. Однако, учитывая сложность условий работы экипажа при выполнении посадки, весьма актуальной является поддержка экипажа со стороны бортового оборудования, заключающаяся в своевременном предоставлении ему объективных оценок складывающейся ситуации, предупреждений об угрозах безопасному выполнению посадки и рекомендаций по принятию решений, направленных на предотвращение выкатывания.

В упомянутых выше разработках основное внимания уделено следующим вопросам:

- выявления угрозы выкатывания самолёта за пределы ВПП на воздушном и наземном этапе посадки и предупреждения экипажа об этой угрозе;
- формирования рекомендаций о прерывании посадки при угрозе выкатывания;
- формирования рекомендаций по использованию устройств торможения при угрозе выкатывания.

В то же время прерывание посадки предполагает два варианта возможных действий: уход на второй круг и повторную попытку посадки или уход на запасной аэродром. Выбор одного из них обусловлен причинами, вызвавшими угрозу выкатывания. Вопрос о поддержке принятия соответствующего решения в настоящее время проработан слабо.

В связи с этим в данной работе рассматривается ситуация, когда экипажем было принято и реализовано решение о прерывании посадки, а дальнейшие действия допускают две указанные выше альтернативы.

Цель работы: повышение безопасности полётов на этапе посадки за счёт поддержки принятия решения об уходе на второй круг или на запасной аэродром после неудачной попытки посадки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- анализа факторов, влияющих на принятие решения об уходе на второй круг или запасной аэродром;
- выбора метода накопления и формализации знаний, используемых для принятия данного решения;
- разработки архитектуры базы знаний (БЗ) бортовой оперативно советующей экспертной системы;
- разработки прототипа бортовой оперативно советующей экспертной системы;
- исследования прототипа бортовой оперативно советующей экспертной системы.

1. Анализ факторов, влияющих на принятие решения об уходе на второй круг или запасной аэродром, и выбор метода формализации знаний

На основании проведённых консультаций с экспертом – профессиональным пилотом был сделан вывод от том, что решение об уходе на второй круг или запасной аэродром после прерванной посадки принимается пилотами самолёта с учётом многих факторов, среди которых можно отметить следующие:

- требования руководящих документов;
- запас топлива на борту самолёта;
- текущие и прогнозируемые метеоусловия в аэропорту посадки и в запасном аэропорту;
- состояние ВПП в аэропорту посадки;
- метеоминимумы членов экипажа, самолёта и ВПП;
- субъективную оценку экипажем своей готовности выполнить повторную посадку в текущих условиях и др.

Источником экспертных знаний о способах принятия указанных решений может являться накопленный опыт успешного решения аналогичных задач при различных сочетаниях перечисленных факторов. В связи с этим было принято решение о разработке БЗ для принятия решения об уходе на второй круг или запасной аэродром на основе метода вывода по прецедентам [Федунов, 2023].

Для решения по прецеденту некоторой прикладной задачи необходимо найти в предметной области, в которой возникла данная задача, аналогичные задачи (АЗ), которые были успешно решены в прошлом. Эти задачи образуют множество прецедентов. Каждый прецедент характеризуется условиями (совокупностью факторов), в которых он был реализован. Для построения БЗ эти условия формализуются в виде ситуационного вектора SV .

В [Федунов, 2023] показано, как каждый прецедент представляется своим нечётким множеством (НМ-прецедента), определённом на декартовом произведении наборов значений координат ситуационного вектора. Данное декартово произведение представляет собой универсальное множество нечётких множеств прецедентов (УМ-прецедентов). Конкретные значения координат ситуационного вектора, описывающие условия возникновения задачи, которую нужно решать – это точка в УМ-прецедентов. Значение функции принадлежности каждого НМ-прецедента в этой точке – это приоритет прецедента.

2. Разработка базы знаний бортовой оперативно советующей экспертной системы

В качестве прикладной задачи в данной работе рассматривается ситуация, когда при выполнении посадки после касания ВПП системой ситуационной осведомлённости [Product Description, 2009, Safety Innovation, 2022, Goodwill, 2014, Юневич, 2024, Коконцева, 2025] была выявлена угроза продольного выкатывания самолета, и экипажем было принято решение о прерывании пробеге по ВПП и взлете. После отрыва самолёта от ВПП экипаж должен принять решение либо о повторной попытке посадки (уход на второй круг), либо об уходе на запасной аэродром. Необходимо разработать БЗ бортовой оперативно советующей экспертной системы, обеспечивающую формирование соответствующей рекомендации экипажу на основе накопленного положительного опыта принятия подобных решений.

Для разработки БЗ проведен поиск и анализ реальных случаев принятия таких решений и результатов их выполнения, которые составили множество АЗ. В результате их анализа были выявлены два прецедента:

- уход на второй круг;
- уход на запасной аэродром.

Также на основе анализа АЗ были выявлены факторы, значимые для принятия одного из перечисленных решений. Для прототипа экспертной системы было принято решение ограничиться учётом трёх факторов, которые представлены в виде ситуационного вектора **SV**, включающего следующие элементы:

- скорость попутной составляющей ветра;
- величина установившегося квазипостоянного отрицательного продольного ускорения самолёта при пробеге по ВПП;
- допустимое время ожидания улучшения условий посадки (ослабления попутного ветра и (или) повышения коэффициента сцепления ВПП), ограниченное запасом топлива для ухода на запасной аэродром.

Следует отметить, что установившееся продольное ускорение самолёта при торможении на ВПП включено в вектор **SV**, как величина, косвенно характеризующая реальный коэффициент сцепления с ВПП в момент неудачной посадки. Проведенные стендовые эксперименты показали, что при торможении самолёта на ВПП, как правило, наблюдается участок, на котором производная ускорения близка к нулю [Юневич, 2024].

Элементам вектора **SV** поставлены в соответствие лингвистические переменные (ЛП), представленные в табл. 1.

Таблица 1

Имя ЛП	Смысл	Терм-множество		Универсальное множество	
l_1	Скорость попутного ветра		Слабый		3..15 м/с
			Умеренный		
			Сильный		
l_2	Продольное ускорение		Слабое		-4..-0,1 м/с ²
			Среднее		
			Нормальное		
l_3	Допустимое время ожидания		Малое		5..30 мин
			Среднее		
			Большое		

Для каждого термина было сформировано нечёткое множество. Универсальные множества представлены в табл. 1, а обобщённый вид функций принадлежности показан на рис. 1.

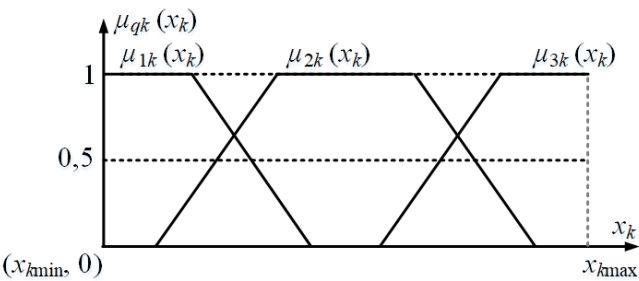


Рис. 1. Нечёткие множества ЛП, соответствующих элементам ситуационного вектора

На рис. 1 обозначены: $\mu_{1k}(x_k)$ и $\mu_{3k}(x_k)$ – соответственно нижняя и верхняя границы универсального множества $\mu_{qk}(x_k)$, $\mu_{2k}(x_k)$ – функция принадлежности термина l_2 . В соответствии с методом вывода на основе прецедентов [Федунов, 2023] была построена экспериментальная матрица, фрагмент которой представлен в табл. 2. Экспериментальная матрица содержит известные из опыта состояния ситуационного вектора, при которых был реализован тот или иной прецедент.

Таблица 2

№ блока	№ АЗ	l_1	l_2	l_3	Прецедент
		Слабый Умеренный Сильный	Слабое Среднее Нормальное	Малое, Среднее, Большое	
1	1.1	Слабый	Среднее	Большое	Второй круг
	2.1	Умеренный	Нормальное	Среднее	
2	2.1	Сильный	Слабое	Малое	Запасной аэродром
	2.2	Умеренный	Среднее	Малое	

3. Пример решения задачи в базе знаний бортовой оперативно-советующей экспертной системы

Вид процедурной матрицы БЗ и процесс логического вывода на ней проиллюстрируем на примере решения конкретной задачи. Условия задачи определяются состоянием вектора **SV**, представленного в табл. 3.

Таблица 3

SV	x_1	x_2	x_3
Значение	5 м/с	-3 м/с ²	20 мин

В результате вычисления функций принадлежности термов ЛП из табл. 1 при текущем состоянии вектора **SV** процедурная матрица принимает вид, представленный в табл. 4.

Таблица 4

Процедурная матрица знаний							
№ блока	№ АЗ	Ситуационный вектор SV Значения функций принадлежности			min по строке	мах по блоку	Прецеденты
1	1.1	1	0	0.5	0	0,2	Второй круг
	1.2	0,4	1	0,2	0,2		
2	2.1	0	0	0	0	0	Запасной аэродром
	2.2	0,4	0	0	0		

Из табл. 4 видно, что в данном примере в качестве рекомендуемого решения будет выбран прецедент №1 – уход на второй круг с повторной попыткой посадки.

Использованный в докладе метод построения БЗ реализован в экспериментальном прототипе бортовой оперативно советующей экспертной системы. Были проведены исследования данного прототипа на стенде комплекса бортового оборудования самолета МС-21 [Юневич, 2024], [Коконцева, 2025].

Заключение

Проведённый анализ причин продольного выкатывания самолётов за пределы ВПП при посадке и известных способов предотвращения таких происшествий указывает на необходимость развития средств поддержки принятия экипажем самолёта решений при возникновении угрозы выкатывания. В данной работе рассмотрена задача принятия решения об уходе на второй круг или запасной аэродром в ситуации прерывания посадки после касания ВПП.

Для разработки БЗ бортовой оперативно советующей экспертной системы, вырабатывающей соответствующие рекомендации, выбран метод вывода на основе прецедентов.

В ходе работы был сформирован набор аналогичных задач, отражающих опыт успешного принятия решений в подобной ситуации. Эти знания были формализованы в виде нечёткого ситуационного вектора и экспериментальной матрицы знаний. Для реализации вывода по прецедентам построена процедурная матрица знаний, разработаны алгоритмы вывода.

Разработанная БЗ реализована в прототипе бортовой оперативно советующей экспертной системы, поддерживающей принятие решений при прерванной посадке. Проведены стендовые исследования созданного прототипа системы.

Список литературы

- [Анализ, 2021] Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2020 году. – М.: Федеральное агентство воздушного транспорта. Управление инспекции по безопасности полетов, 2021.
- [Мозоляко, 2014] Мозоляко А.В., Акимов А.Н., Воробьев В.В. Проблемы предотвращения выкатывания гражданских воздушных судов на этапе пробеге по ВПП // Научный вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 204. – С. 74-77.
- [Государственная политика, 2017] Государственная политика в области предотвращения авиационных происшествий, связанных с использованием ВПП. Семинар по безопасности полетов, Москва, Внуково, 2017. Федеральное агентство воздушного транспорта. 2017.
- [EPAS, 2024] European Plan for Aviation Safety (EPAS) 2024. – 13th ed. 23 Jan 2024. EASA. 2024. [Электронный ресурс] // EASA. – URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/european-plan-aviation-safety-epas-2024#group-easa-downloads> (дата обращения: 28.05.2025).
- [Бородкин, 2024] Бородкин С.Ф., Волынчук А.И., Киселев М.А., Петров Ю.В. Возможности и недостатки систем предупреждения выкатывания воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы // Научный вестник МГТУ ГА.

- 2023. – № 3. [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-i-nedostatki-sistem-preduprezhdeniya-vykatyvaniya-vozдушного-sudna-za-predely-vzletno-posadochnoy-polosy> (дата обращения: 07.04.2025).
- [Georges, 2017]** Georges P. EUROCAE ED-250: ROAAS MOPS. Runway Overrun Alerting and Awareness System Minimum Operational Performance Specifications. GRSS 2017. Lima, Peru. [Электронный ресурс] // ICAO. – 2017. – URL: https://www.icao.int/Meetings/GRSS-2/Documents/Panel%207/7.1_EUROCAE%20ED-250%20v7%20light.pdf (дата обращения: 09.04.2025).
- [Product Description, 2009]** Product Description, Flight Safety Functions of the Enhanced Ground Proximity Warning System. Honeywell International Inc. 2009. [Электронный ресурс] // Honeywell. – 2009. – URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/898.pdf> (дата обращения: 09.04.2025).
- [Safety Innovation, 2022]** Safety Innovation #5: Runway Overrun Prevention System (ROPS) and Runway Safety Suite. [Электронный ресурс] // Airbus. – 2022. – URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-10-safety-innovation-5-runway-overrun-prevention-system-rops-and-runway> (дата обращения: 09.04.2025).
- [Goodwill, 2014]** Goodwill S. Runway situation awareness tools (RSAT). Flight Technical and Safety [Электронный ресурс] // The Boeing Company. – 2014. – URL: [https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20\(RSAT\).pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20(RSAT).pdf) (дата обращения: 09.04.2025).
- [Коконцева, 2025]** Коконцева С.Ю., Федунев Б.Е., Юневич Н.Д. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня на фазах посадки воздушного судна // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2025. – № 1. – С. 121-139. – doi: 10.31857/S0002338825010105.
- [Методика, 2022]** Себряков Г.Г., Мужичек С.М., Тестова Т.М., Маслова Л.А. Методика предупреждения выкатывания летательного аппарата со взлетно-посадочной полосы и предупреждения его повреждения при движении по аэродрому // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. – 2022. – Вып. 4(59). – С. 46-56.
- [Аспидова, 2022]** Аспидова А.М., Еремин А.И., Федунев Б.Е. Интеллектуальная поддержка решения задачи оперативного целеполагания экипажем самолета на этапе «Посадка»: коллизия «Пробег по ВПП - угроза «Слабое торможение» // Известия Российской Академии Наук. Теория и системы управления. – 2022. – № 6. – С. 133-149.
- [Юневич, 2024]** Юневич Н.Д., Липатов А.А., Коконцева С.Ю. Демонстрационный образец бортовой оперативно советующей экспертной системы этапа полета «Посадка»: первая версия базы знаний, результаты ее испытаний на стенде КБО МС-21 // Труды ГосНИИАС. Серия: Авиационные системы. – 2024. – № 1(64). – С. 19-32.
- [Федунев, 2023]** Федунев Б.Е. Решение задач по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем тактического уровня на этапах выполнения миссии подвижным объектом // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2023. – № 1. – С. 137-147. doi: 10.31857/S0002338823010018.