

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения

М.А. Киселев¹, Ю.С. Калюжный², А.В. Карпов², Ю.В. Петров¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Федеральное автономное учреждение «Государственный
научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия

Аннотация: В настоящее время большое количество авиационных происшествий связано с потерей управления в полете и столкновением с землей в управляемом полете. Зачастую это происходит вследствие изменения условий полета, относительно которых происходила подготовка к вылету, и связано с необходимостью оперативного перестроения маршрута полета в условиях повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени на принятие решения. Причинами перестроения ранее принятого и реализуемого в автоматическом, директорном или ручном режимах управления плана полета может стать, например, возникновение на пути следования грозových очагов или появление не учтенных при планировании искусственных или естественных препятствий. Отсутствие полной ситуационной осведомленности является достаточно частой причиной авиационных происшествий для воздушных судов малой авиации. Авиационные происшествия самолетов транспортной категории, как правило, связаны с неправильными действиями экипажа при обнаружении на пути следования опасных зон полета. В статье, носящей обзорный характер, анализируются современные бортовые средства обнаружения препятствий, а также необходимые действия пилота, связанные с изменением маршрута полета с целью облета препятствий, обнаруженных в ходе полета. Показано, что современный уровень развития авионики обеспечивает необходимую для облета препятствий ситуационную осведомленность, но требует принятия своевременных, правильных и зачастую неочевидных решений экипажем по перестроению маршрута полета. Используемые же в смежных областях робототехническими комплексами различного назначения алгоритмы, обеспечивающие автоматическое перестроение маршрута движения с целью обхода препятствий, не могут быть напрямую использованы или адаптированы для реализации на борту воздушного судна в силу отсутствия учета при построении маршрутов обхода препятствий специфических особенностей воздушных судов – ограничений на управляющие параметры (угол атаки, перегрузка, угол крена); возможности системы управления (располагаемые темп создания перегрузки, располагаемая и максимально допустимая угловая скорость крена и др.). Следовательно, актуальной представляется задача разработки системы поддержки принятия решения пилота по облету препятствий, обеспечивающей синтез альтернативных безопасных маршрутов облета препятствий, оптимальных по заданному пилотом критерию (минимальные потери времени, минимальные дополнительные затраты топлива и т. п.).

Ключевые слова: полет по маршруту, облет препятствий, алгоритмы облета препятствий, построение траекторий движения, автоматизация полета.

Для цитирования: Киселев М.А. Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting

M.A. Kiselev¹, Yu.S. Kalyuzhny², A.V. Karpov², Yu.V. Petrov¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

²Federal Autonomous Organization "State Scientific Research Institute of Aviation
Systems", Moscow, Russia

Abstract: Currently, the large number of aircraft accidents is associated with the loss of control in flight and a controlled flight into terrain. It frequently occurs due to a change of flight conditions, relatively which a preparation for departure was carried out, and involves the necessity to reroute efficiently in the conditions of increased psychophysiological load and time constraint for decision-making. Generated thunderstorm cells on route, artificial or natural obstacles, not considered while planning a route, can result in

amending a flight plan, which was earlier accepted and implemented in the automatic, flight director or manual modes of control. The lack of comprehensive situational awareness is fairly a frequent cause of aviation accidents for general aviation aircraft. Aviation accidents of transport category aircraft are typically associated with incorrect crew actions when dangerous flight zones are detected along the route. The article represents an overview and analyzes modern onboard facilities to detect obstacles, as well as required pilot actions to reroute a flight for in-flight detected obstacle avoidance. The current level of avionics development provides situational awareness necessary for obstacles avoidance but requires timely, correct and sometimes non-obvious flight crew rerouting decisions. The algorithms used with robotic packages of various applications in related fields ensure the automatic rerouting for obstacle avoidance. They cannot be directly used or adapted for the implementation on board an aircraft due to the lack of consideration for aircraft specific features when obstacle avoidance routing, i.e., restrictions of control parameters (an angle of attack, overload, roll angle), capabilities of a control system (available rate of overload, available and maximally allowable angular rolling velocity, etc.). Therefore, the issue to develop a system to support pilot decisions for obstacle avoidance is relevant. It encompasses the synthesis of safe alternatives for obstacle avoidance which are optimal by a pilot-assigned criterion (minimum loss of time, minimum additional fuel consumption, etc.).

Key words: flight on route, obstacle avoidance, algorithms of obstacle avoidance, construction of motion trajectories, flight automation.

For citation: Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V. (2023). Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Введение

Анализ статистики авиационных происшествий (АП), произошедших в период с 2011 по 2020 год¹ в Российской Федерации, показывает, что значительная часть АП как при осуществлении коммерческих перевозок, так и при совершении полетов авиации общего назначения (АОН) связано со следующими группами событий (рис. 1–4):

- столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT);
- потеря управления в полете (LOC-I);
- столкновение с землей в управляемом полете (CFIT);
- попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC);
- попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW).

Результаты расследований указанных АП показали, что значительная часть АП обусловлена отсутствием полной ситуационной осведомленности и неправильными действиями экипажа в условиях повышенной психо-

физиологической нагрузки и дефицита времени на принятие решения.

Так, 28 апреля 2002 года произошла катастрофа вертолета Ми-8, которая привела к гибели 8 человек, находившихся на борту, в том числе и губернатора Красноярского края Александра Ивановича Лебеда. Вертолет выполнял полет в горной местности на высоте ниже безопасной и в условиях ограниченной видимости на высоте около 35 метров столкнулся с проводами грозозащиты ЛЭП, потерял управляемость и столкнулся с заснеженной поверхностью земли, получив при этом значительные повреждения. Очевидно, что наличие информации о взаимном расположении пилотируемого вертолета и ЛЭП могло бы предотвратить указанную катастрофу.

В то же время информирование экипажа о наличии препятствия на маршруте полета не является достаточным для предотвращения АП. Так, 22 августа 2006 года под Донецком произошла катастрофа самолета Ту-154М авиакомпании «Пулково». При полете на высоте, близкой к высоте практического потолка, экипаж неправильно оценил метеоусловия, принял запоздалое решение об обходе слева с набором высоты грозовых очагов и после входа в зону опасных метеоявлений вывел самолет на критические углы атаки, что привело к его сваливанию, перешедшему в плоский штопор, в результате чего воздушное судно (ВС) столкнулось с землей с большой вертикальной скоростью.

¹ Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2020 году [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта управление инспекции по безопасности полетов, 2021. 97 с. URL: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2021/04/1598384_a3450354b90aa72fe5588472bb4eedfc.pdf (дата обращения: 08.10.2022).

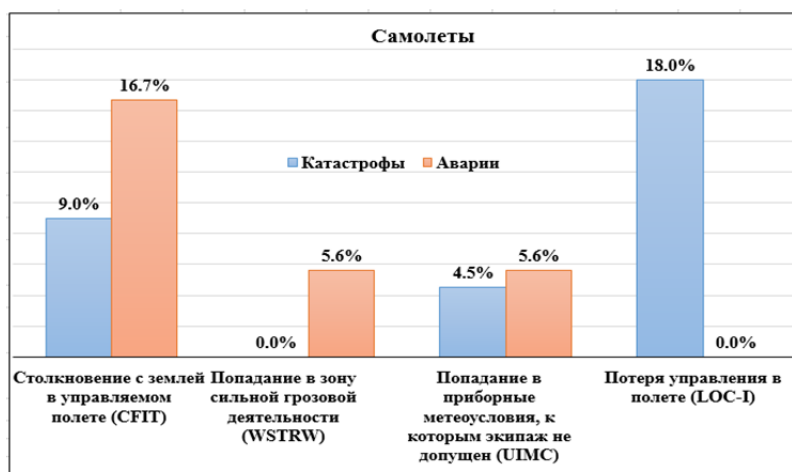


Рис. 1. Типы событий, определившие авиационные происшествия с самолетами коммерческой авиации в 2011–2020 годах

Fig. 1. Types of events that caused aviation accidents with commercial aircraft in 2011–2020s

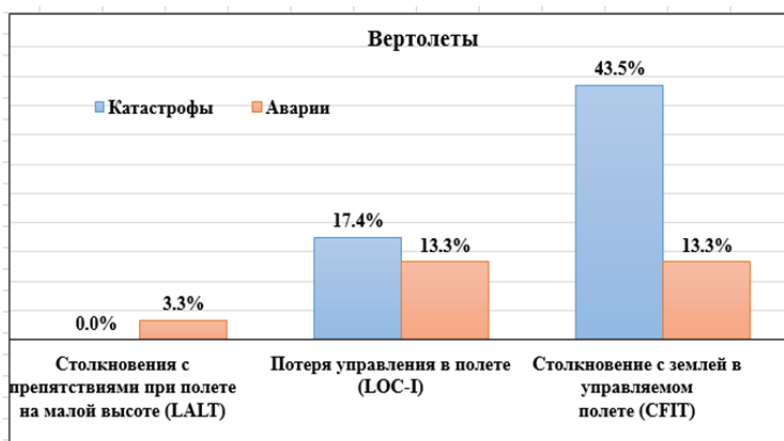


Рис. 2. Типы событий, определившие авиационные происшествия с вертолетами коммерческой авиации в 2011–2020 годах

Fig. 2. Types of events that caused aviation accidents with commercial helicopters in 2011–2020s

Можно утверждать, что своевременное предоставление экипажу одного или нескольких альтернативных безопасных вариантов продолжения полета могло бы предотвратить указанную катастрофу.

Таким образом, актуальной в широком смысле является задача идентификации потенциально опасных ситуаций полета и формирования альтернативных безопасных вариантов его продолжения. В частности, несомненный практический интерес представляет задача оперативной реконфигурации реализуемого плана (маршрута) полета в условиях возникновения угрожающего безопасности

полета ВС препятствия, например, наземного естественного или искусственного объекта, опасной области пространства и т. п.

Анализ существующих подходов к облету ВС препятствий

Современные ВС могут реализовывать полет в автоматическом или директорном режиме в соответствии с заданным в бортовом компьютере маршрутом полета. Способ задания и содержание плана полета зависит от типа ВС. Так, план полета магистральных ВС

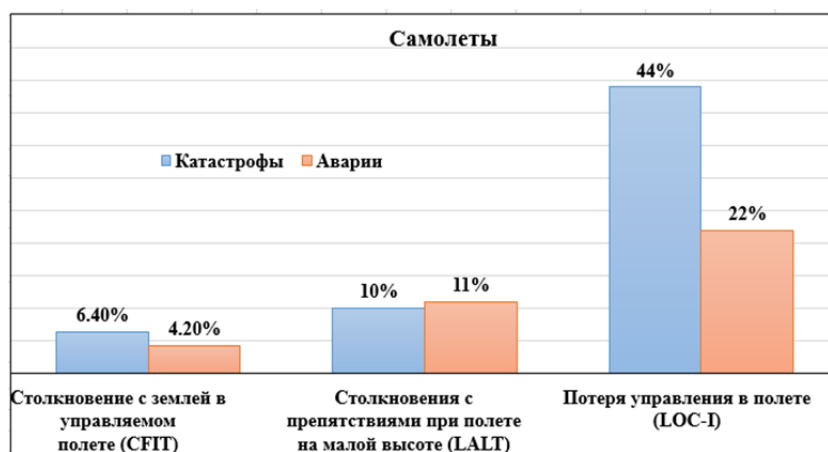


Рис. 3. Типы событий, определившие авиационные происшествия с самолетами АОН в 2011–2020 годах

Fig. 3. Types of events that caused aviation accidents with general aviation aircraft in 2011–2020s

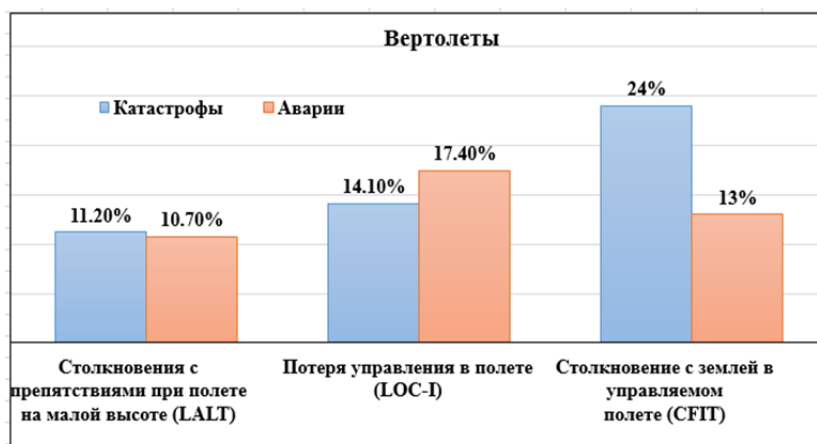


Рис. 4. Типы событий, определившие авиационные происшествия с вертолетами АОН в 2011–2020 годах

Fig. 4. Types of events that caused aviation accidents with general aviation helicopters in 2011–2020s

включает не только полет по воздушным трассам, но и стандартные маршруты вылета по приборам (SID), стандартные процедуры прибытия (STAR) и захода на посадку (APPROACH), разрабатываемые для каждого аэропорта. Однако в части собственно маршрута полета принципиальных отличий между ВС, как правило, нет, и маршрут задается с помощью точек в пространстве, включающих исходный, поворотные и конечный пункты маршрута. Маршрут полета может быть разработан и внесен в бортовой компьютер непосредственно самим пилотом или рассчитан на наземных компьютерах с использованием

специализированного программного обеспечения и затем уже загружен на борт. На рис. 5 для примера представлен экран монитора системы G3000 Garmin, разработанной для легких ВС с газотурбинными двигателями, с заданным пользователем маршрутом полета в виде ломаной, соединяющей выбранные из базы данных стандартные или заданные пользователем точки маршрута. Однако после взлета изменение маршрута, отклонение от него может совершаться только пилотом в автоматическом (например, путем добавления новых точек маршрута или задания нового курса полета) или ручном режиме.

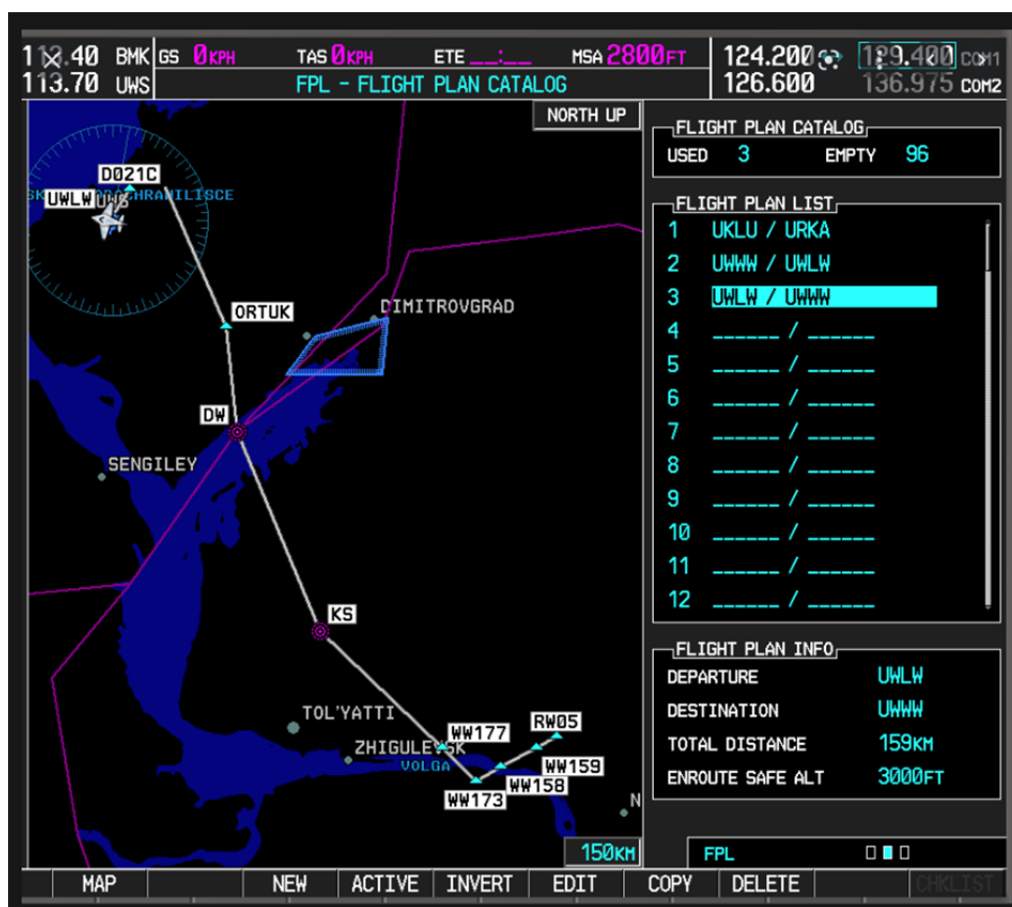


Рис. 5. Пример маршрута полета, сформированный на экране G3000 Garmin
Fig. 5. Example of a flight route displayed on the G3000 Garmin screen

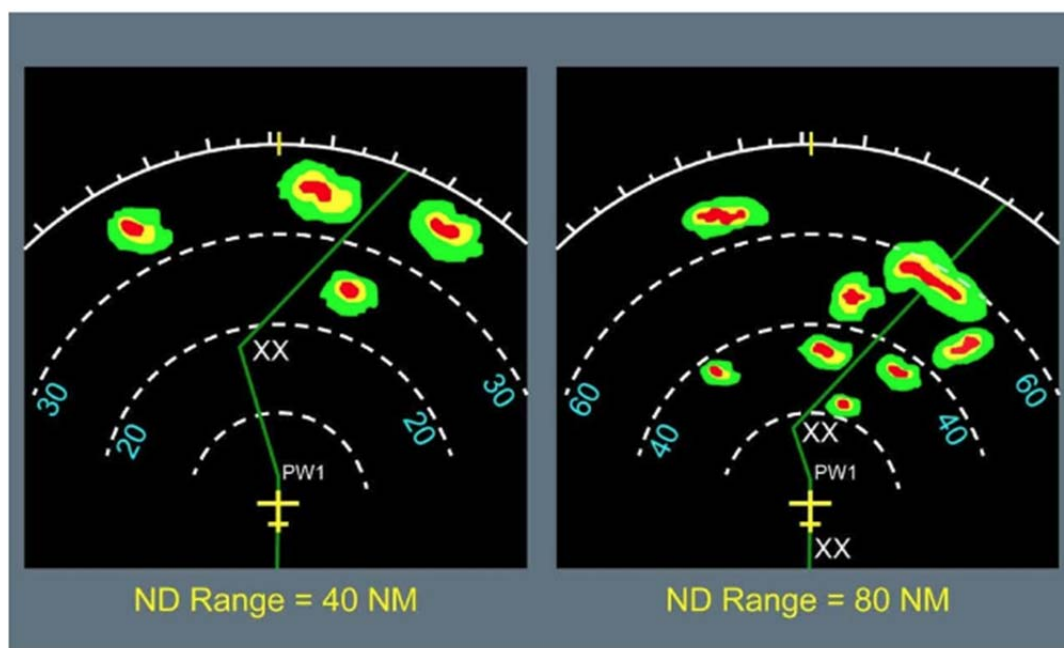


Рис. 6. Пример грозового фронта на масштабе 40 и 80 морских миль
Fig. 6. Example of a line squall on a scale of 40 and 80 nautical miles

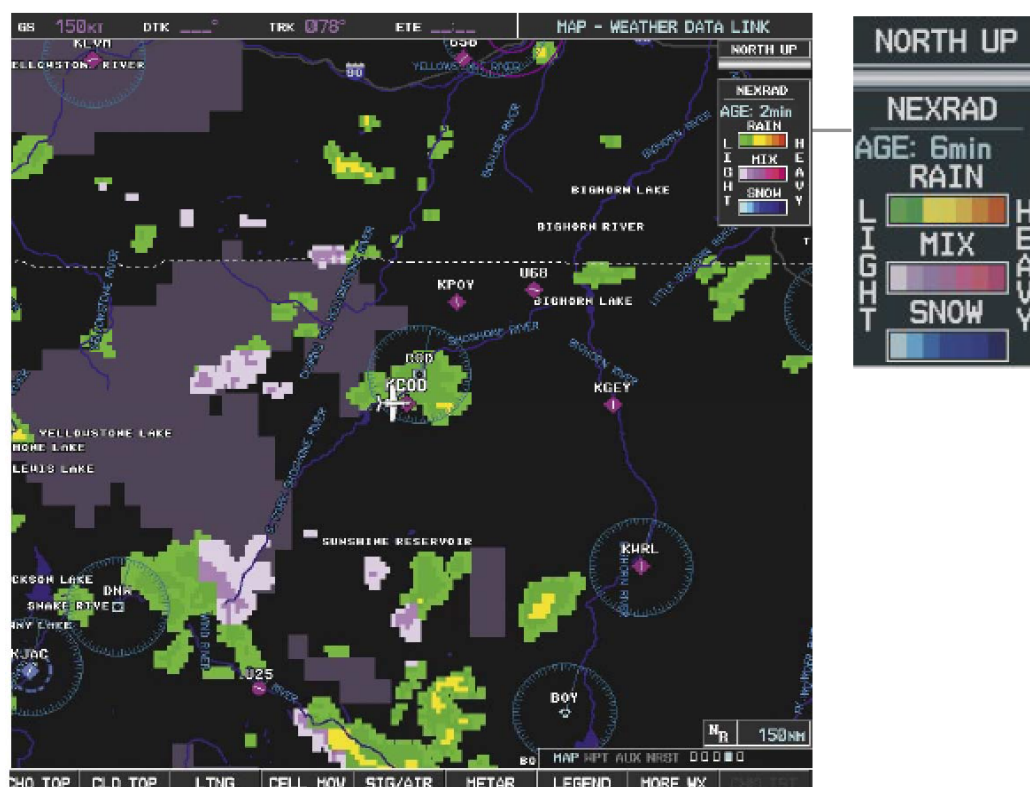


Рис. 7. Пример отображения карты погоды в комплексе компании Garmin
Fig. 7. Example of a weather map display in the Garmin suite



Рис. 8. Пример отображения системы синтетического видения в комплексе компании Garmin
Fig. 8. Example a synthetic vision system display in the Garmin suite

Следует отметить, что экипажи современных ВС обладают достаточной для совершения безопасного полета ситуационной осведомленностью.

Так, например, информация об опасных явлениях погоды может быть получена пилотом

от бортовых метеолокаторов или штормоскопов, а также по широкополосным каналам связи. На рис. 6 приведен пример грозового фронта в двух масштабах на многофункциональном индикаторе ВС типа Airbus. На рис. 7 показан внешний вид карты погоды, получае-

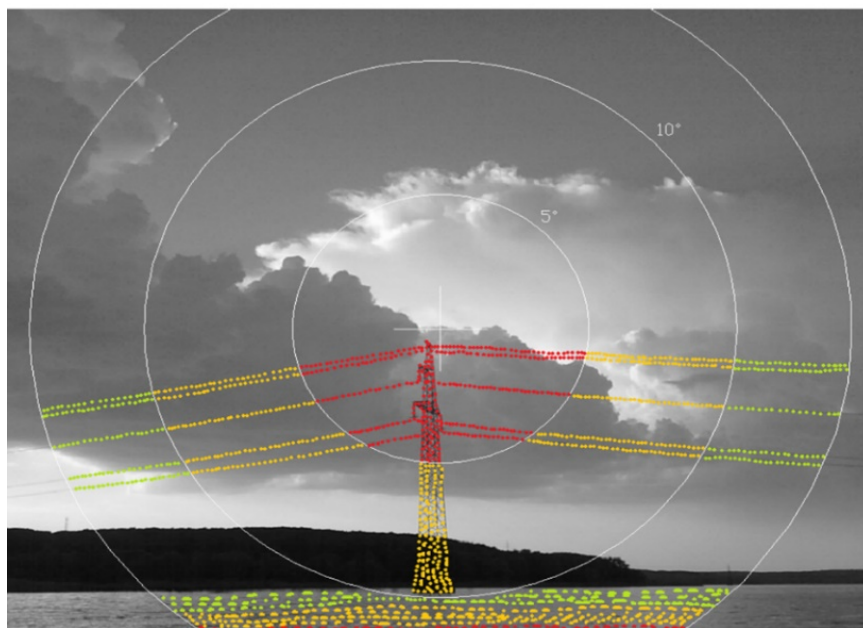


Рис. 9. Пример отображения распознавания препятствий
Fig. 9. Example of an obstacle detection display

мый по спутниковому каналу связи комплекса G1000 Garmin ². Как следует из рисунков, пилот имеет возможность определить вид метеоявления (по цвету), степень опасности метеоявления (по интенсивности цвета), а также детально исследовать размеры и очертания зоны, изменяя масштаб изображения [1].

При полетах на малых высотах критической является информация об искусственных препятствиях и рельефе местности. Указанная информация содержится на борту ВС в виде цифровых карт местности и регулярно, как правило раз в одну или две недели, обновляется. В частности, цифровые карты используют системы синтетического видения и системы предотвращения столкновения с землей (TAWS) [2] ссылка на источник <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/2472/0000/Testing-the-helicopter-obstacle-avoidance-system/10.1117/12.212025.short?SSO=1>. На рис. 9 представлен пример отображения подстилающей поверхности, синтезированный на экране комплекса Garmin. Видно, что синтетическое изображение отличается реалистичностью и обес-

печивает экипаж достаточной информацией о рельефе местности по пути следования ВС в любых условиях.

Кроме того, для обнаружения препятствий на пути следования ВС могут комплектоваться камерами различных диапазонов (видимого и инфракрасного), георадарами и дальномерами. Так, в настоящее время широкое распространение получили лидары [3] ссылка на источник <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954406215618684>. Пример комплексного изображения, полученного от камер видимого и инфракрасного диапазонов, совмещенного с данными от лидара, приведен на рис. 9. Видно, что представленное изображение позволяет обнаружить и идентифицировать искусственное препятствие на маршруте полета ВС.

Общее для всех указанных выше технических средств то, что они являются информационными и по сути только визуализируют информацию о приближающемся препятствии, оставляя пилоту весь последующий набор действий, необходимый для безопасного облета препятствия, а именно:

- обнаружение препятствия на экране монитора;
- идентификацию препятствия;

² Pilot's Guide G1000 Integrated flight deck Cessna citation mustang [Электронный ресурс] // garmin.com. 2007. 508 p. URL: https://static.garmin.com/pumac/G1000:CessnaMustang_PilotsGuide.pdf (дата обращения: 08.10.2022).

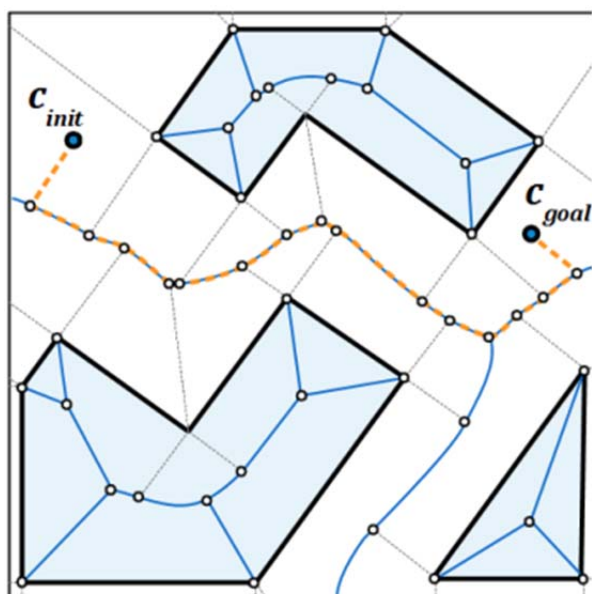


Рис. 10. Пример диаграммы Вороного
Fig. 10. Voronoi Diagram example

- оценку степени его опасности;
- принятие решения по способу облета препятствия;
- реализацию принятого решения.

Отметим, что в зависимости от режима полета и дальности обнаружения препятствия время, доступное пилоту для реализации указанных выше действий, может быть существенно разным. Но, как правило, указанные действия выполняются пилотом в очень сжатых временных рамках в условиях повышенного психоэмоционального напряжения, что, как показывает представленный выше анализ АП, а также результаты исследований [4] данного источника нет в электронном виде, но многочисленно повторяется в списках литературы диссертаций, может приводить к возникновению ошибок даже в достаточно простых ситуациях. В этой связи представляет несомненный интерес инструментарий, позволяющий в сжатые сроки рассчитать и предложить пилоту один или несколько альтернативных безопасных и реализуемых ВС вариантов продолжения полета с облетом возникшего препятствия.

Для оперативного перестроения маршрута полета существует целый набор апробированных алгоритмов обхода препятствий [5], используемых различными робототехническими комплексами, такими, например, как беспилот-

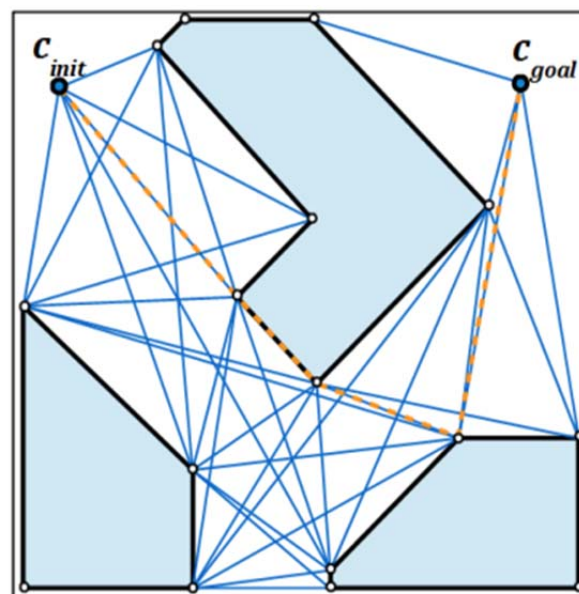


Рис. 11. Пример диаграммы видимости
Fig. 11. Visibility Diagram example

ные грузовые тележки, автомобили, роботы-пылесосы и т. п. Рассмотрим для примера некоторые из таких алгоритмов, а именно:

- диаграмму Вороного;
- граф видимости;
- метод быстро исследующих случайных деревьев (Rapidly-Exploring Random Trees, RRT);
- Bug-алгоритм.

Работа алгоритм на основе диаграммы Вороного [3] ссылка на источник <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954406215618684>, заключается в построении вариантов маршрута, состоящего из отрезков, точки которого равноудалены от точек, составляющих геометрию облетаемых препятствий. Пример построения такого маршрута приведен на рис. 10. Алгоритм может построить сразу несколько вариантов облета препятствий, из которых кратчайший маршрут можно определить, используя, например, алгоритм Дейкстры [6, [6, 7] вот ссылка на данный источник <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-obespecheniya-ustoychivosti-telekommunikatsionnoy-seti-za-schet-ispolzovaniya-ee-topologicheskoy-izbytochnosti>. Недостаток алгоритма на основе диаграммы Вороного заключается в существенном замедлении расчета при увеличении количества препятствий.

Метод построения на основе графа видимости [8] заключается в определении промежу-

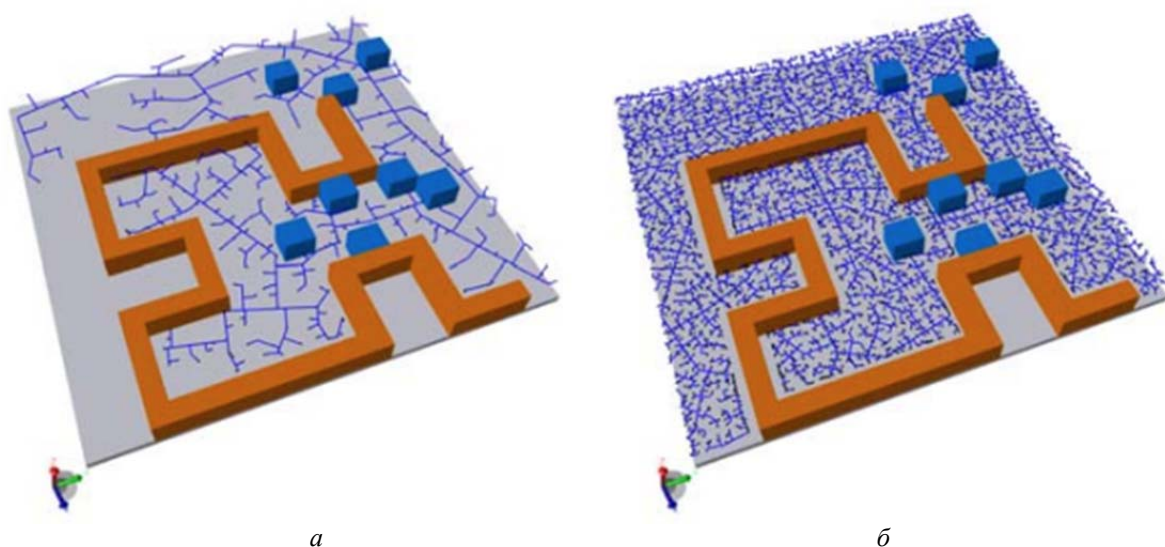


Рис. 12. Пример построения дерева поиска алгоритмом RRT: *a* – 1 000 итераций, *б* – 2 000 итераций
Fig. 12. Example of building a search tree using the RRT algorithm
a – 1000 iterations, *b* – 2000 iterations

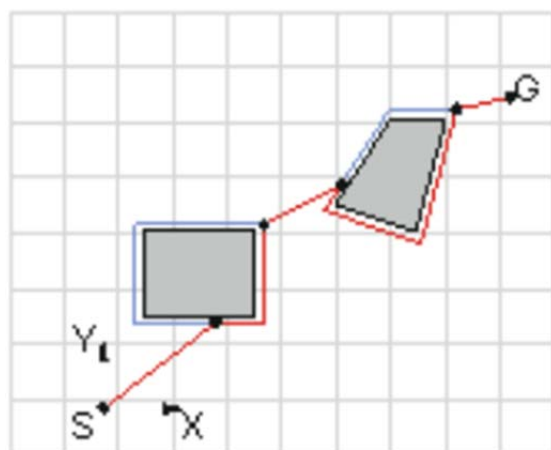


Рис. 13. Пример варианта Bug-алгоритма с выходом на ближайшую точку к цели
Fig. 13. Example of a Bug-variant algorithm with entering the nearest point to the target

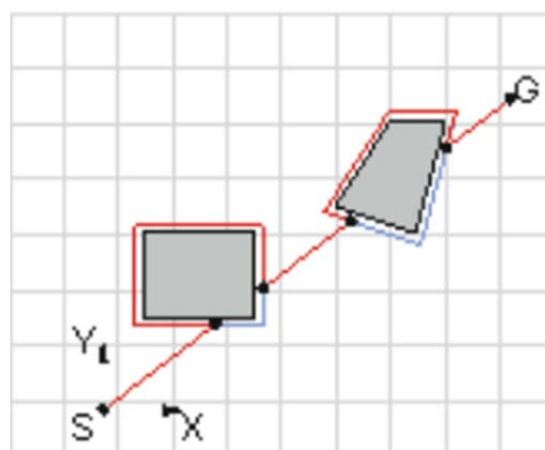


Рис. 14. Пример варианта Bug-алгоритма с сохранением наклона прямой на цель
Fig. 14. Example of a Bug-variant algorithm with maintaining the inclination of a straight line to the target

точных пар точек между начальной и конечной точками маршрута облета, которые можно соединить прямой линией, не пересекающей заданные препятствия. Недостаток метода заключается в наличии ограничений в виде требований к форме препятствий – алгоритм работает только с препятствиями, имеющими форму многогранника или многоугольника. Пример построения маршрутов с помощью диаграммы видимости приведен на рис. 11.

Метод быстро исследующих случайных деревьев (RRT) [9] относится к методам слу-

чайного выбора. Данный метод заключается в построении дерева узловых точек из случайных положений, расположенных как можно ближе к требуемому конечному положению ВС, с последующим удалением двух возможных положений, которые при их соединении пересекают запрещенные области. Пример построения дерева поиска алгоритмом RRT представлен на рис. 12. На данном рисунке приведено два решения с разным количеством итераций, рис. 12, *a* – 1 000 итераций, рис. 12, *б* – 2 000 итераций. Преимуществом

данного метода является относительно небольшое увеличение времени, необходимого для расчета, при увеличении количества препятствий. Недостатком данного метода является то, что алгоритм выдает только один вариант облета препятствия, который может быть не оптимальным в смысле протяженности маршрута.

Bug-алгоритм [10] ориентирован на использование в автономных самоходных роботах. В качестве входных данных алгоритм использует получаемую в процессе функционирования робота информацию о препятствиях и о цели движения. Суть алгоритма заключается в том, что робот движется к цели и, встречая препятствие перед собой, начинает его обходить, пока не вернется на исходный маршрут. Алгоритм имеет несколько разновидностей. Так, обход препятствия может продолжаться до тех пор, пока робот не выйдет на точку, ближайшую к цели (рис. 13). В другой версии алгоритма робот при движении стремится сохранить курс на цель, и обход препятствия заканчивается, когда текущий курс становится равным начальному (рис. 14). Недостаток алгоритма заключается в том, что строится только один маршрут обхода препятствий, который может быть не кратчайшим.

Общим недостатком рассмотренных алгоритмов является то, что все они не могут быть напрямую использованы для построения маршрутов облета на борту ВС ввиду того, что определяемый ими маршрут представляет собой траекторию, синтезированную без учета существующих ограничений на управляющие параметры ВС, такие, например, как нормальная скоростная перегрузка, угол атаки и др. [11] ссылка на данный источник <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12878365>.

Существующие на сегодняшний день подходы по созданию траекторий, реализуемых на борту ВС, можно условно разделить на две группы.

Исследования первой группы [12] ссылка на данный источник <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23824218> базируются на вероятностном подходе и связаны с решением задач преодоления противовоздушной обороны

(ПВО). Указанный подход предполагает возможность входа в зоны ПВО, а значит, не может быть использован напрямую для решения обозначенной выше задачи облета препятствий.

Исследования второй группы [[13-17]–17] нацелены на решение локальной задачи – увода ВС от столкновения с препятствием и не предполагают дальнейшего продолжения реализации исходного маршрута полета.

Заключение

Представленный выше анализ АП указывает на необходимость создания алгоритмов, обеспечивающих оперативное перестроение плана (маршрута) полета в процессе его выполнения. Можно утверждать, что наличие таких алгоритмов на борту ВС способствовало бы предотвращению целого ряда произошедших катастроф с ВС различных категорий.

Современный уровень развития бортового оборудования обеспечивает достаточную для идентификации препятствий и определения степени их опасности ситуационную осведомленность пилота. В то же время повышенная психофизиологическая нагрузка и дефицит времени на принятие решения делают затруднительным самостоятельный поиск правильного решения по облету препятствий.

Используемые в смежных областях алгоритмы обхода препятствий не могут быть использованы на борту ВС в силу наличия существенных особенностей ВС как объекта управления.

Таким образом, на сегодняшний день актуальной задачей является разработка специализированных бортовых алгоритмов, обеспечивающих перестроение маршрута полета. Ключевыми требованиями к таким алгоритмам являются:

- 1) определение множества альтернативных маршрутов, обеспечивающих облет препятствий на безопасном расстоянии в автоматическом или в директорном режимах управления ВС с учетом возможностей и характеристик ВС;

- 2) автоматическое разделение множества альтернативных маршрутов по заданным

критериям (минимизация дополнительных затрат времени, необходимых для облета препятствий, минимизация дополнительных затрат топлива, необходимых для облета препятствий облета, минимальное боковое отклонение от исходного маршрута полета, минимальное отклонение от исходного маршрута по высоте полета и др.) с выделением оптимальных маршрутов по каждому из заданных критериев.

Список литературы

1. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для вузов / П.И. Дудник, Г.С. Кондратенков, Б.Г. Татарский, А.Р. Ильчук, А.А. Герасимов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
2. Stevenson G. Testing the helicopter obstacle avoidance system / G. Stevenson, H.R. Verdun, P.H. Stern, W. Koechner // In: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1995. Pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
3. Shao M.-L., Yan R.-J., Wu J. et al. Sensor-based exploration for planar two-identical-link robots // In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016. Vol. 230, iss. 4. Pp. 655–664. DOI: 10.1177/0954406215618684
4. Якименко О.А. Содержание «интеллектуализации борта» глазами летчика // Техника воздушного флота. 1996. Т. 70, № 3–4. С. 11–16.
5. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. Т. 28, № 4. С. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14
6. Alshammrei S., Boubaker S., Kolsi L. Improved dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance // Computers, Materials & Continua. 2022. Vol. 72, no. 3. Pp. 5939–54. DOI: 10.32604/cmc.2022.028165
7. Макаренко С.И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 3. С. 14–30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302
8. Berg M. Computational geometry: Algorithms and applications / M. Berg, O. Cheong, M. Kreveld, M. Overmars. 3rd ed. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. 386 p. DOI: 10.1007/978-3-540-77974-2
9. Cao L. 3D trajectory planning based on the rapidly-exploring random Tree-Connect and artificial potential fields method for unmanned aerial vehicles / L. Cao, L. Wang, Y. Liu, S. Yan [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2022. Vol. 19, iss. 5. 17 p. DOI: 10.1177/17298806221118867 (дата обращения: 08.10.2022).
10. Mohsen A.M., Sharkas M.A., Zaghlool M.S. New real time (M-Bug) algorithm for path planning and obstacle avoidance in 2D unknown environment // In: 29th International Conference on Computer Theory and Applications, ICCTA 2019. Alexandria, Egypt, 2019. Pp. 25–31. DOI: 10.1109/ICCTA48790.2019.9478801
11. Киселев М.А., Костин А.М., Тюменев В.Р. К оптимизации управления траекторным движением самолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 125. С. 138–145.
12. Арапов О.Л., Зуев Ю.С. Формирование опорной траектории, обеспечивающей преодоление опасной зоны // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2015. № 3 (102). С. 14–22.
13. Beliatkaia A.P., Vorobev V.V., Eliseev B.P. Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing // In: 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021. Moscow, 29–30 May 2021. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239
14. Акимов А.Н., Воробьев В.В. Методика и алгоритмы увода летательного аппарата от пространственной поверхности ограничения // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 18–25.
15. Akimov A.N., Vorobyov V.V., Zatchny D.A. Aircraft drift away from limiting

surfaces along programmed trajectories. In: Limiting modes of aircraft flight. Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2022. Pp. 75–91. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_5

16. Akimov A.N., Vorobyov V.V., Zatchny D.A. Onboard restraint systems. State of the issue. Formulation of the problem. In: Limiting modes of aircraft flight. Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2022. pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_1

17. Акимов А.Н. Особенности проектирования легких боевых и учебно-тренировочных самолетов: монография / А.Н. Акимов, В.В. Воробьев, О.Ф. Демченко, Н.Н. Долженков, А.И. Матвеев, В.А. Подобедов. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.

References

1. Dudnik, P.I., Kondratenkov, G.S., Tatarsky, B.G., Ilchuk, A.R., Gerasimov, A.A. (2006). Aviation radar complexes and systems. Moscow: VVIA im. Prof. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 1112. (in Russian)

2. Stevenson, G., Verdun, H.R., Stern, P.H., Koechner, W. (1995). Testing the helicopter obstacle avoidance system. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025

3. Shao, M-L., Yan, R-J., Wu, J. et al. (2016). Sensor-based exploration for planar two-identical-link robots. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 230, issue 4, pp. 655–664. DOI: 10.1177/0954406215618684

4. Yakimenko, O.A. (1996). The content of “cockpit digitalization” through the pilot’s eyes. *Tekhnika vozdušnogo flota*, vol. 70, no. 3-4, pp. 11–16. (in Russian)

5. Kazakov, K.A., Semenov, V.A. (2016). An overview of modern methods for motion planning. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, vol. 28, no. 4, pp. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14 (in Russian)

6. Alshammrei, S., Boubaker, S., Kolsi, L. (2022). Improved Dijkstra algorithm

for mobile robot path planning and obstacle avoidance. *Computers, Materials & Continua*, vol. 72, no. 3, pp. 5939–54. DOI: 10.32604/cmc.2022.028165

7. Makarenko, S.I. (2018). Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, no. 3, pp. 14–30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302 (in Russian)

8. Berg, M., Cheong, O., Kreveld, M., Overmars, M. (2008). Computational geometry: Algorithms and applications. 3rd ed. Springer Berlin, Heidelberg, 386 p. DOI: 10.1007/978-3-540-77974-2

9. Cao, L., Wang, L., Liu, Y., Yan, S. (2022). 3D trajectory planning based on the rapidly-exploring random Tree-Connect and artificial potential fields method for unmanned aerial vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, issue 5, 17 p. DOI: 10.1177/17298806221118867 (accessed: 08.10.2022).

10. Mohsen, A.M., Sharkas, M.A., Zaghlol, M.S. (2019). New real time (M-Bug) algorithm for path planning and obstacle avoidance in 2D unknown environment. In: *29th International Conference on Computer Theory and Applications, ICCTA 2019*. Alexandria, Egypt, pp. 25–31. DOI: 10.1109/ICCTA48790.2019.9478801

11. Kiselev, M.A., Kostin, A.M., Tyumenev, V.R. (2008). To optimization of trajectory movement management of the plane. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 125, pp. 138–145. (in Russian)

12. Arapov, O.L., Zuev, Yu.S. (2015). Reference trajectory design for overcoming dangerous zone. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, no. 3 (102), pp. 14–22. (in Russian)

13. Belitskaia, A.P., Vorobev, V.V., Eliseev, B.P. (2021). Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing. In: *18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021*. Moscow: Institute of Electrical and Elec-

tronics Engineers Inc, pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239

14. Akimov, A.N., Vorob'ev, V.V. (2001). A method and algorithms for veering a flying apparatus from the spatial constraint surface. *Automation and Remote Control*, vol. 62, no. 7, pp. 1042–1048.

15. Akimov, A.N., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A. (2022). Aircraft drift away from limiting surfaces along programmed trajectories. In: *Limiting modes of aircraft flight*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore, pp. 75–91. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_5

16. Akimov, A.N., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A. (2022). Onboard restraint systems. State of the issue. Formulation of the problem. In: *Limiting modes of aircraft flight*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore, pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_1

17. Akimov, A.N., Vorob'yev, V.V., Demchenko, O.F., Dolzhenkov, N.N., Matveev, A.I., Podobedov, V.A. (2005). Design features of lightweight combat and training aircraft: a monograph. Moscow: Mashinostroyeniye, p. 368. (in Russian)

Сведения об авторах

Киселев Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, m.kiselev@mstuca.aero.

Калюжный Юрий Сергеевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», yury.kalyuzhny@gmail.com.

Карпов Андрей Викторович, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС», ya.karanvik@gmail.com.

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, doctor561@rambler.ru.

Information about the authors

Mikhail A. Kiselev, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.aero.

Yury S. Kalyuzhny, Lead Engineer, FAO “State Scientific Research Institute of Aviation Systems”, yury.kalyuzhny@gmail.com.

Andrey V. Karpov, Lead Engineer, FAO “State Scientific Research Institute of Aviation Systems”, ya.karanvik@gmail.com.

Yuriy V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, doctor561@rambler.ru.

Поступила в редакцию 26.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 26.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023