

Труды МАИ. 2023. № 128
Trudy MAI, 2023, no. 128

Научная статья
УДК 629.7.05
DOI: [10.34759/trd-2023-128-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-15)

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛИДАРА СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ СЕРВИСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Александр Сергеевич Кошкар¹, Валентина Павловна Семенова²✉

^{1,2}Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

¹koshkarof@gmail.com

²vsvally@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается порядок разработки математической модели лидача для системы предупреждения столкновений сервисного транспортного средства на территории аэродрома во время эксплуатационного обслуживания воздушных судов. На основе рассмотренных особенностей организации движения сервисных транспортных средств на территории аэродрома и инженерного программного пакета Matlab построена модель движения топливозаправщика во время эксплуатации самолета ТУ-204 в момент пиковой загруженности графика обслуживания.

Ключевые слова: воздушное судно, система предупреждения столкновений, моделирование

Для цитирования: Кошкаров А.С., Семенова В.П. Разработка имитационной модели лидара системы предупреждения столкновений сервисного транспортного средства // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-15)

Original article

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF THE LIDAR COLLISION WARNING SYSTEM OF A SERVICE VEHICLE

Alexander S. Koshkarov¹, Valentina P. Semenova²✉

^{1,2}Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint-Petersburg, Russia

¹koshkarof@gmail.com

²vsvally@mail.ru✉

Abstract. The article describes the order of mathematical model developing of the lidar for the collision warning system of a service vehicle on the aerodrome territory while the aircraft maintenance. Based on the considered specifics of traffic organization of the service vehicles on the aerodrome territory and engineering software pack MATLAB, a model of a fuel tanker movement while the TU-204 aircraft operation at the moment of peak service schedule congestion. The relevance of the presented model consists in the following. Transition to the new economic paradigm and digital economy is impossible without the expansion of air transportation. Increasing traffic flows require precise organization and constant control in the loading and maintenance areas. More and more machinery and engineering personnel are required. A logical solution to this problem is automation of processes, including autonomous driving functions delegating to service and transport

vehicles. In modern aviation community, more and more attention is being paid to research and development of end-to-end automation processes with minimum human intervention – hyperautomation. Thus, this trend is one of the priorities of the strategy of scientific and technological development in the Russian Federation. The problems solving complexity in this area is being characterized by limited visual observation, which consists in the lack of opportunity for the crew to see the maneuvering equipment on the route of movement, and the lack of forbidden zones. Thus, this article considers the possibility of improving the traffic of service vehicles control system and aircraft on the territory of the aerodrome by placing collision avoidance equipment at the movement of service and maintenance vehicles, based on the lidar application and capabilities assessing of the method of employing sensors of incoming information on the parameters of the external environment.

Keywords: aircraft, collision avoidance system, simulation

For citation: Koshkarov A.S., Semenova V.P. Development of a simulation model of the lidar collision warning system of a service vehicle. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-15](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-15)

Введение

Переход к новому экономическому укладу и цифровой экономики невозможен без расширения сферы воздушных транспортных перевозок. Возрастающие транспортные потоки требуют точной организации и постоянного контроля в зонах проведения погрузочных работ и технического обслуживания. Требуется привлечение все большего количества техники и инженерного персонала. Такая загруженность приводит к авариям и иным инцидентам, происходящим на

территории аэропорта (рис.1). Ежегодно около 20% от всех авиационных происшествий составляют инциденты, произошедшие во время эксплуатации воздушных судов [1].

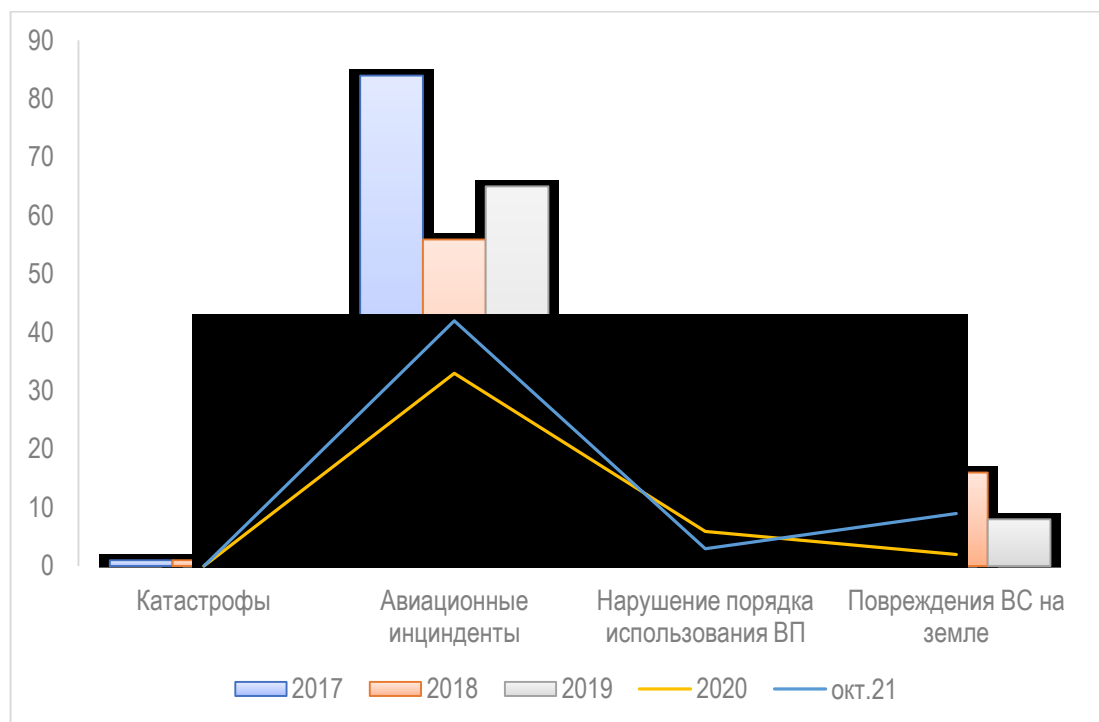


Рис. 1. Сравнительный анализ состояния безопасности полетов по информационным бюллетеням за 2017-2021 год

Логичным решением этой проблемы является автоматизация процессов, в том числе делегирование сервисным и транспортным средствами функций автономного вождения. В современном авиационном сообществе все больше внимания уделяется исследованию и разработке процессов сквозной автоматизации с минимальным вмешательством человека – гиперавтоматизации, поэтому данное направление является одним из приоритетов стратегии научно-технологического развития в Российской Федерации. Сложность решения задач в этой области характеризуется ограниченностью визуального обзора, заключающегося в отсутствии возможности у

экипажа видеть маневрирующую технику на маршруте движения, и отсутствием запретных зон.

В данной работе рассматривается возможность совершенствования системы управления движением сервисных транспортных средств и воздушных судов на территории аэродрома за счет размещения средств предотвращения столкновений при движении сервисных и обслуживающих транспортных средств, на базе использования лидара и оценки возможностей способа использования датчиков поступающей информации о параметрах внешней среды [2-3].

Особенности организации движения сервисных транспортных средств и воздушных судов внутри аэропорта

Для создания максимально приближенной к реальным условиям модели движения сервисного транспортного средства (ТС) на территории аэродрома был проведен анализ уставных документов, организующих движение транспорта в аэропорту.

Техника перемещается по территории всего аэропорта, но для проблемы, поднимаемой в данной работе, более подробно будет рассмотрено движение техники на аэродроме: на взлетно-посадочных полосах, рулежных дорожках (РД) и перроне. Перрон, представляющий собой большую забетонированную площадку для стоянки воздушного судна (ВС) на время его обслуживания, имеет разметку в виде трёх цветов: белого, желтого и красного. Согласно инструкции по организации движения

спецтранспорта и средств механизации на гражданских аэродромах, о цветах разметки можно сказать следующее.

Белым цветом обозначены пути руления спецмашин, которые строго движутся по ограниченной этими линиями дороге. Если дорога двухсторонняя, она имеет прерывистую белую линию по середине. Также, белой разметкой отмечены прямоугольники, где должны размещаться средства наземного обслуживания. На картах места стоянки разделяются для каждого вида транспорта с целью повышения организованного движения и уменьшения загруженности трафика. Также белым цветом обозначаются: стоп-линия перед пересечением путей руления самолётов; T-образный знак, который маркирован возле зоны обслуживания и через который в зону въезжает вся спецтехника. Въезд на данном участке строго контролируется агентом по наземному обслуживанию – инспектором по досмотру (ДОП).

Жёлтым цветом обозначаются пути руления самолётов, а также номера мест стоянок, места остановки автобусов для посадки пассажиров. Также жёлтая прерывистая разметка обозначает границу перрона.

Красным цветом обозначается восьмиугольник зоны обслуживания воздушного судна и зона маневрирования телескопического трапа (красные штрихи). Красные прямоугольники обозначают места выводов топливных магистралей: в современных аэропортах заправка самолетов топливом осуществляется подключением специального шланга к муфте «колонки», трубы от резервуаров с авиакеросином к которой проложены под землей.

Красно-белые полосы обозначают парковочные зоны для машин и оборудования.

Движение на территории аэродрома также ограничивается скоростным режимом. В зоне обслуживания нельзя двигаться быстрее 5 км/ч. Вдоль терминалов и других зданий – не более 10 км/ч, по перрону 15-20 км/ч, а по объездным дорогам скорость движения может достигать до 40 км/ч [4-6]. На всей технике установлены средства спутникового отслеживания, например, система мониторинга GPS/ГЛОНАСС Omnicomm, которая отслеживает перемещение транспортного средства и соблюдение скоростного режима. При условиях недостаточной видимости на территории аэродрома скоростной режим имеет другие, более серьезные ограничения.

Передвижение ТС в зоне обслуживания строго регулируется десятью простыми командами руководителя подъездом и отъездом. После остановки спецмашины руководитель подъездом устанавливает колодки. При отъезде также соблюдаются общепринятые правила: сначала убирается дальняя от самолёта колодка, потом спецмашина отъезжает, после чего убирается вторая колодка. Въезжать в зону обслуживания можно только после получения разрешения ДОПа. Запрещено въезжать до остановки двигателей, выключения проблескового маяка, установки колодок и конусов, проведения послеполётного осмотра. За 7-8 метров до самолёта необходимо полностью остановиться, проверив тормоза. Не допускается нахождение в зоне обслуживания ВС неиспользуемых средств наземного обслуживания после окончания работ. На перроне запрещаются обгон, разворот и движение задним ходом,

за исключением случаев необходимости уступить дорогу рулящему самолёту. Для обеспечения соблюдения такого большого ряда правил некоторые авиакомпании, такие как Аэрофлот, Россия, Северный Ветер, имеют в дополнение собственные органы по обеспечению безопасности полета, которые помогают проводить мониторинг движения техники на территории аэропорта в круглосуточном режиме.

Пути движения транспортных средств, как правило, не должны совмещаться с путями руления ВС. Внешние границы путей движения транспортных средств должны проходить на расстоянии не менее 2 м от крайних точек, стоящих и рулящих ВС. Магистральные (двусторонние) пути движения транспортных средств должны быть шириной 7 м, односторонние - 3,5 м. Пути движения транспортных средств должны быть закольцованы. Для этого между группами ВС необходимы специальные проезды шириной 3,5-7,0 м. При ограниченных размерах перрона для организации движения транспортных средств следует устраивать специальные дорожные покрытия, примыкающие к перрону.

Состояние спецмашин, используемых для выполнения работ на РД, должно соответствовать требованиям правил дорожного движения (ПДД). Данные спецмашины должны быть дополнительно оснащены буксировочными устройствами и оборудованы проблесковыми маячками желтого цвета с огнями низкой интенсивности с частотой проблесков 60-90 в минуту интенсивностью 40-400 кд. До замены на новое оборудование допускается использовать проблесковые маячки оранжевого цвета.

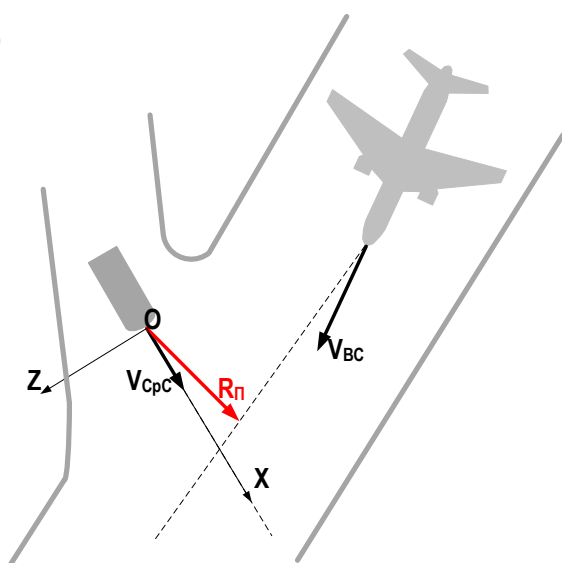
Места стоянки транспортных средств оборудуются на территории службы обеспечения спецтранспортом. На аэродроме в непосредственной близости от перрона может быть предусмотрена оперативная стоянка спецмашин.

За разработку схемы расстановки и движения ВС на перроне и схемы организации движения транспортных средств по перрону, за допуск на территорию аэродрома и движения по территории аэродрома транспортных средств, за выполнение требований Руководства на территории аэродрома несет ответственность руководитель авиационной организации.

Типовые схемы организации обслуживания самолетов аэродромной и сервисной техникой

Для рассмотрения типовых опасностей и аварийных ситуаций во время руления ВС, было выделено два полярных варианта движения: первый, когда оба участника движутся прямолинейно (рис. 2а) и второй: криволинейно (рис. 2б) [7,8].

а)



б)

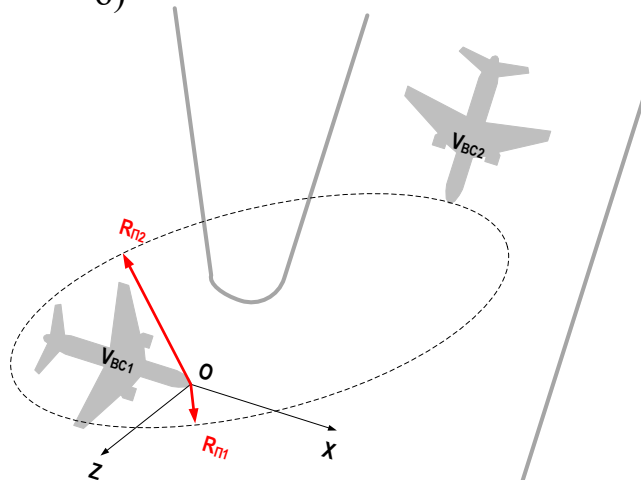


Рис. 2. Схема типовых ситуаций взаимного движения транспорта на территории аэропорта: а) Встречное прямолинейное движение; б) Встречное криволинейное движение

Эти ситуации предлагается рассмотреть в виде типичных вариантов самого простого и самого сложного движения, а все другие варианты движения положим считать промежуточными комбинациями. Для предлагаемых крайних ситуаций были определены условие сближения по изменению приращения координат:

$$\sqrt{(x_{i+1})^2 + (z_{i+1})^2} < \sqrt{(x_i)^2 + (z_i)^2}, \quad (1)$$

и условие предельного радиуса огибания препятствия:

$$R_0 > R_{mc} + R_n, \quad (2)$$

где R_{mc} – характерный радиус транспортного средства, R_n – характерный радиус препятствия.

Таким образом, предлагается внедрить принцип автономного управления движением сервисного средства на территории аэродрома, который будет характеризоваться как рефлекторно-агрегированный, т.е. с заданной частотой дискретизации будет осуществляться измерение параметров, оценивание ситуации в контролируемой зоне движения и выдача (или невыдача) управляющих команд на исполнительные органы движения/остановки [9].

В дополнение к вышесказанному, в каждом аэропорту с учетом местных условий разрабатывается схема расстановки и организации движения воздушных

судов, спецтранспорта и средств механизации на аэродроме, которая утверждается главным оператором аэропорта. Схема расстановки и организации движения воздушных судов, спецтранспорта и средств механизации на аэродроме выполняется в цветном варианте и в масштабе не менее 1:1000. На схеме указываются: оси руления (буксировки) ВС; контуры зон обслуживания ВС; Т-образный знак остановки ВС; Обозначение номеров стоянок ВС; Т-образный знак остановки спецмашин; Пути движения спецмашин [10].

Также, составляются схемы организации движения транспортных средств по перрону, где в свою очередь указывается: расстановка, маршруты руления (буксировки) ВС; места расположения оперативных стоянок и маршруты движения транспортных средств; зоны, запрещенные для движения транспортных средств; места остановки транспортных средств у ВС.

Подъезд (отъезд) спецмашин к воздушным судам осуществляется в соответствии со схемами подъезда (отъезда) и маневрирования спецмашин при обслуживании воздушных судов (рис. 3).

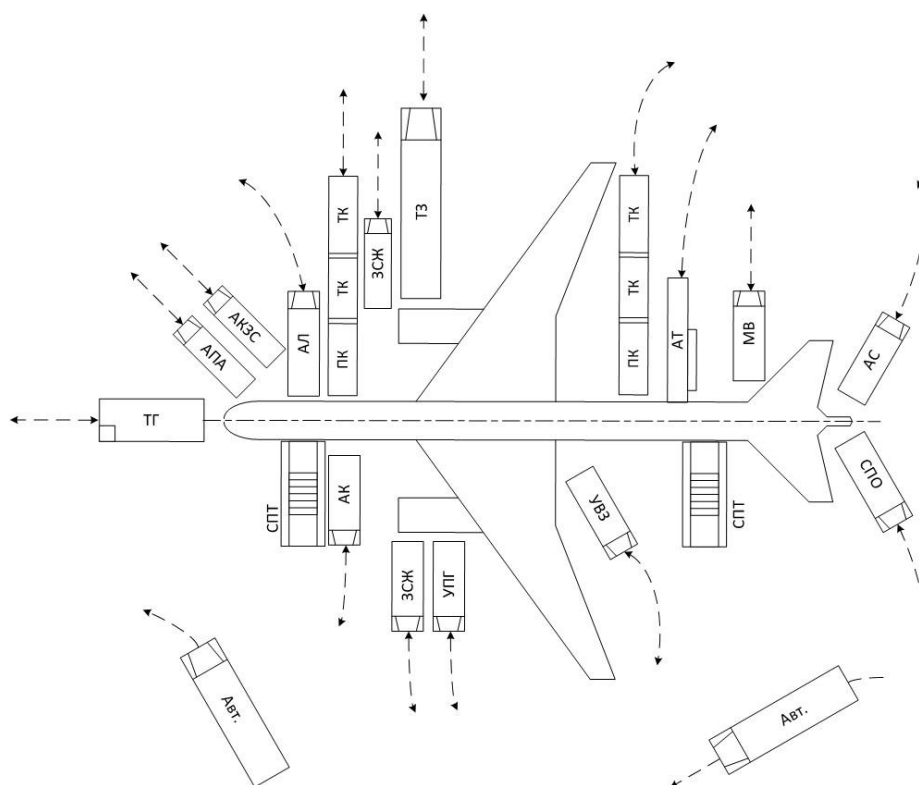


Рис. 3. Схема подъезда, отъезда и маневрирования спецмашин при обслуживании самолета Ту-204 согласно «Инструкции по организации движения спецтранспорта и средств механизации на гражданских аэродромах РФ»

На рисунке 3 изображены следующие спецмашины: Авт. – автобус пассажирский перронный; АК – аэродромный кондиционер воздуха; АЛ – автолифт; АПА – аэродромный подвижной электроагрегат; АТ – автотранспортер; АС – спецмашина для обработки санузлов; АКЗС – аэродромная кислородно-зарядная станция; ЗСЖ – заправщик спецжидкостями; МВ – машина водозаправочная; ПК – погрузчик контейнеров; ТК – тележка для контейнеров; ТЗ – топливозаправщик; СПТ – самоходный пассажирский трап; СПО – самоходная площадка обслуживания; УВЗ – установка воздушного запуска; УПГ – установка для проверки гидросистемы.

Подача спецмашин для обслуживания воздушных судов осуществляется в соответствии с технологическим графиком. Остановка спецмашин при подъезде к

воздушному судну при обслуживании воздушного судна производится на расстоянии не менее 0,5 м от крайних точек воздушного судна. Топливозаправщиков, передвижных заправочных агрегатов и маслозаправщиков - не менее 5 м; моторных подогревателей - не менее 3 м; тепловых обдувочных машин - не менее 3,5 м. Остановка спецмашин при погрузочно-разгрузочных операциях производится на расстоянии не менее 0,1 м от люка воздушного судна. Пассажирские трапы подъезжают на малой скорости до мягкого соприкосновения амортизирующих устройств с воздушным судном [11-13].

Схема, представленная на рисунке 2, будет использоваться в модели в качестве карты, по которой будет формироваться траектория движения сервисного транспортного средства с учетом особенностей расположения другого обслуживающего транспорта вокруг самолета ТУ-204.

Обоснование зоны обзора и критических зон в рабочей зоне обзора разработанной модели

Для достижения получения полной информации об обстановке вокруг транспортного средства воспользуемся областью интереса ROI (Region of Interest). ROI – функция, позволяющая настраивать области изображения, т.е. снимать разные части изображения с разным расширением. Область интереса ROI может быть определена как куб, с заданными параметрами высоты, ширины и длины и системой координат, центр которой совпадает с центром системы координат автомобиля.

Данные об окружающей обстановке собираются по траектории излучаемых лазером, которые генерирует лидар, из-за чего восприятие датчика является

разреженным и дискретным в трехмерном пространстве по нескольким траекториям лазеров. Когда лидар вращается на 360 градусов, траектория каждого луча лазера формирует конус. Таким образом, лидар может быть смоделирован как совокупность нескольких конусов, имеющих одну вертикальную ось [14].

Для достижения более информативного восприятия лазер должен обнаруживать как можно более мелкие объекты в области интереса. Следовательно, каждое подпространство должно быть достаточно маленьким. Для сегментации вводим вписанную сферу для каждого подпространства для дальнейшего описания их размера. Наиболее информативным случаем для восприятия лидара является ситуация, когда радиус наибольшей вписанной сферы минимален.

Подпространства, ограниченные конусами и границами ROI, имеют неправильную форму. Чтобы избежать проблемы субоптимизации сферы дискретизируют кубами. В результате радиус вписанной сферы представлен количеством кубов. Чтобы найти аппроксимацию радиуса вписанной сферы подпространства, нам нужно выбрать из всех кубов в подпространстве подмножество, которое может представлять радиус вписанной сферы [15-17]. Здесь мы используем концентрические цилиндры, центр которых привязан к началу системы координат беспилотного автомобиля, как показано на рисунке 4.

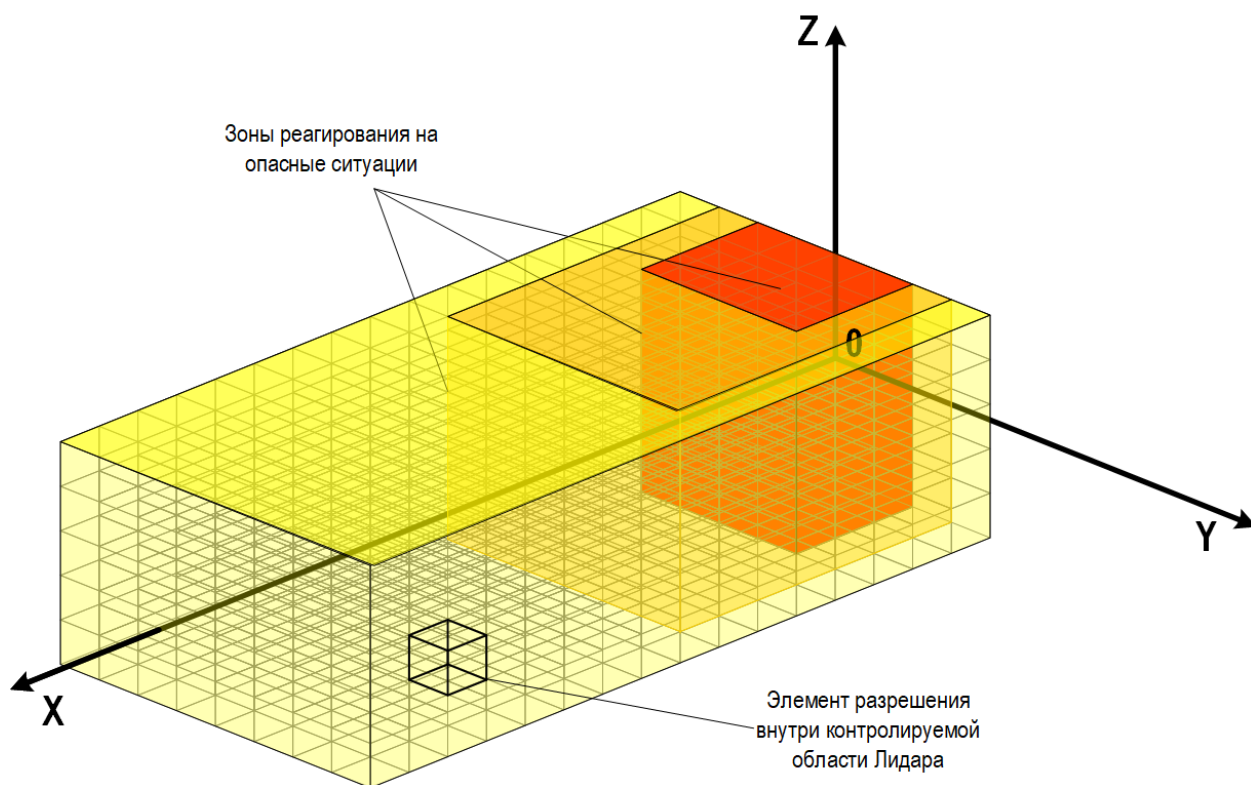


Рис.4. Дискретизация области интереса по кубам

На рисунке 4 также отмечены зоны реагирования на опасные ситуации, введенные в модели.

Определение типов и состава входных параметров моделирования

Для построения модели использовался системный объект rangeSensor программы Matlab [18,19], который представляет собой датчик дальности, способный выводить измерения дальности и угла на основе заданного положения датчика и карты занятости. Показания дальности основаны на препятствиях на карте занятости.

Входными параметрами для rangeSensor являются:

pose – положение датчика на карте в формате $[x, y, \theta]$, где x, y – линейные координаты в метрах, а θ – угол направления датчика относительно положительного направления x рамки карты в радианах;

map – объект наземной карты, представляющий собой совокупность ячеек, которая может быть или занятой или нет.

Числовые значения параметров rangeSensor представлены в таблице 1.

Таблица 1

Входные характеристики сканирующего устройства

Название характеристики	Значение
Минимальная и максимальная дальность обнаружения, м	[0;20]
Минимальный и максимальный горизонтальный угол обнаружения, рад	$[-\pi/2; \pi/2]$
Разрешение показаний горизонтального угла, рад	0,0244
Стандартное отклонение шума диапазона, рад	0
Стандартное отклонение шума горизонтального угла, рад	0
Количество выходных показаний	258

Так как карта имеет сложный рисунок, она была составлена в редакторе Microsoft Visio и далее переведена в программе Matlab в матричный вид с помощью команды im2double, которая преобразует изображение от целочисленных типов данных до области значений [0, 1].

Для составления карты (рис. 5) была взята схема подъезда, отъезда и маневрирования спецмашин при обслуживании самолета Ту-204 (рис. 3). Принимая

во внимание технологический график обслуживания была выбрана та область обслуживания, где одновременное количество спецтранспорта было максимальным.



Рис. 5. Карта занятости обслуживания самолета ТУ-204 согласно «Инструкции по организации движения спецтранспорта и средств механизации на гражданских аэродромах РФ»

На рисунке 4 последовательно в виде прямоугольников изображены: автолифт, погрузчик контейнеров с двумя тележками для контейнеров, топливозаправщик (отмечен серым цветом, так как его движение будет промоделировано далее), автотранспортер, машина водозоправочная и спецмашина для обработки санузлов.

Для лучшего представления движения топливозаправщика масштаб осей был увеличен в 20 раз. Таким образом, длина воздушного судна составляет 60 метров $((1400-200)/20)$. Движение топливозаправщика осуществляется со скоростью 10 км/ч.

Масштаб осей зоны контроля представлены в соотношении 10:1. Таким образом, на расстоянии 16 метров от препятствия индикатор загорается желтым светом, что означает вход транспортного средства в зону предупреждения. На

расстоянии равном 6 метрам, транспортное средство находится в оранжевой зоне, где система формирует команды для предотвращения столкновения. В представленном примере – снижение скорости. В критическую зону ТС попадает тогда, когда расстояние между ним и препятствием становится меньше 3 метров. В данной зоне осуществляется остановка движущегося транспорта и изменение его параметров движения: траектории и скорости.

Визуализация карты обнаруженных препятствий строится на основе данных, поступающих от лидара, имеющего угол обзора в 180° и дальность действия 20 метров.

Результаты моделирования представлены в виде четырех графиков, где последовательно расположена информация о движении сервисного транспортного средства на территории аэродрома (рис.6),

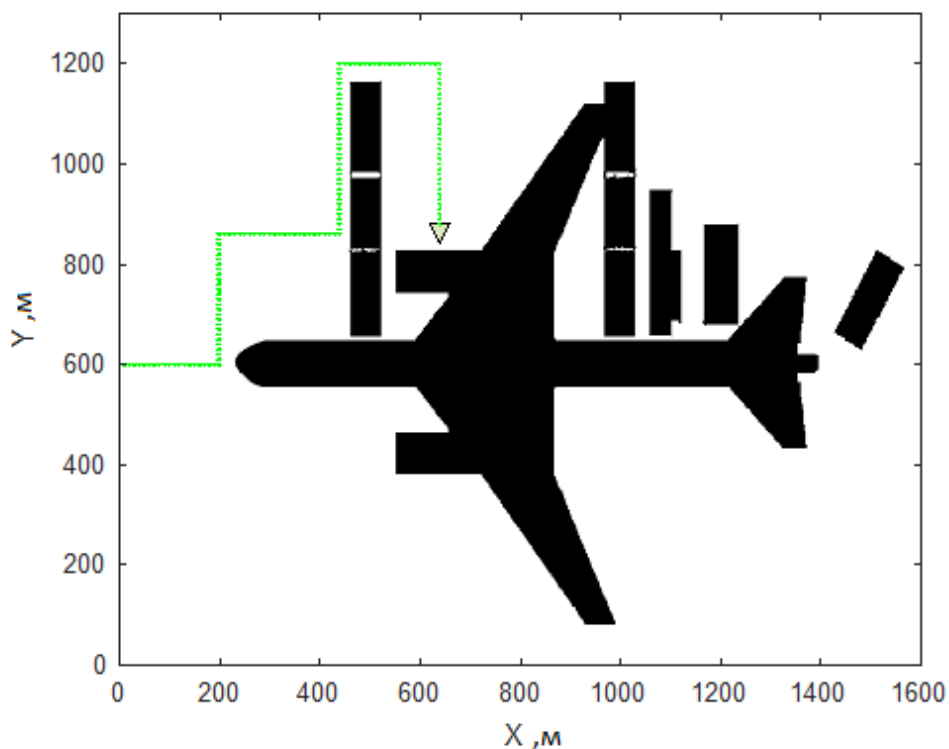


Рис.6. Моделируемая схема расположения объектов и траектория движения транспортного средства

информация о препятствиях и зонах, в которых эти препятствия обнаруживаются (рис.7),

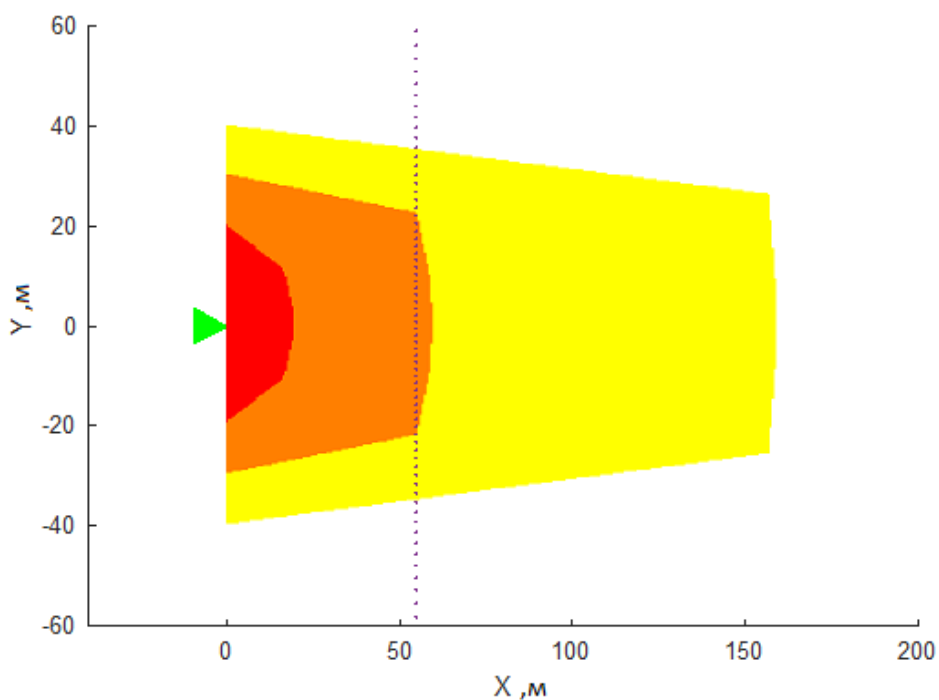


Рис.7. Зоны контроля лидара на транспортном средстве.

На основе данных от лидара строится карта им обнаруженных препятствий (рис.7),

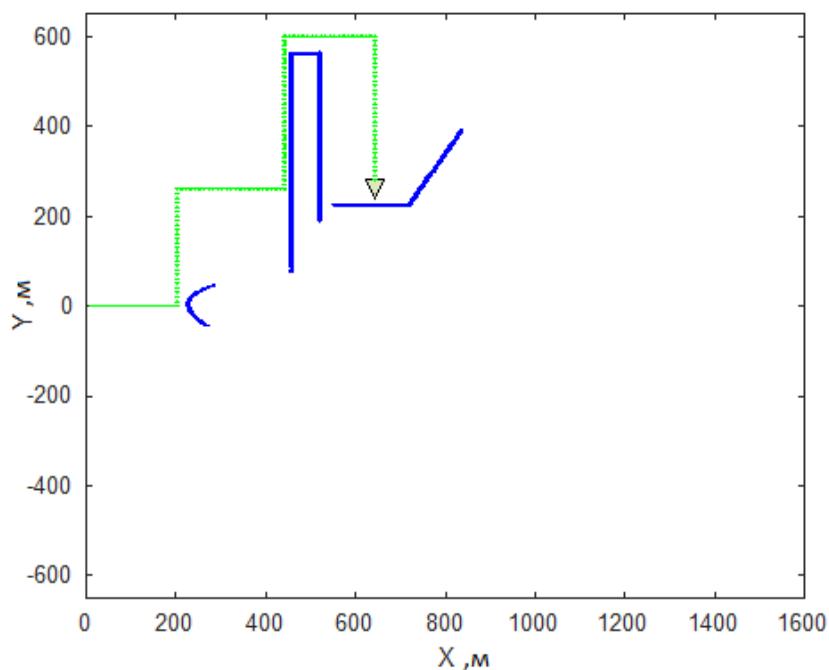


Рис.8. – Карта на основе данных от лидара и обнаруженные препятствия

а также демонстрируется цветовой индикатор принятия решений по предупреждению столкновений в модели (рис. 9).

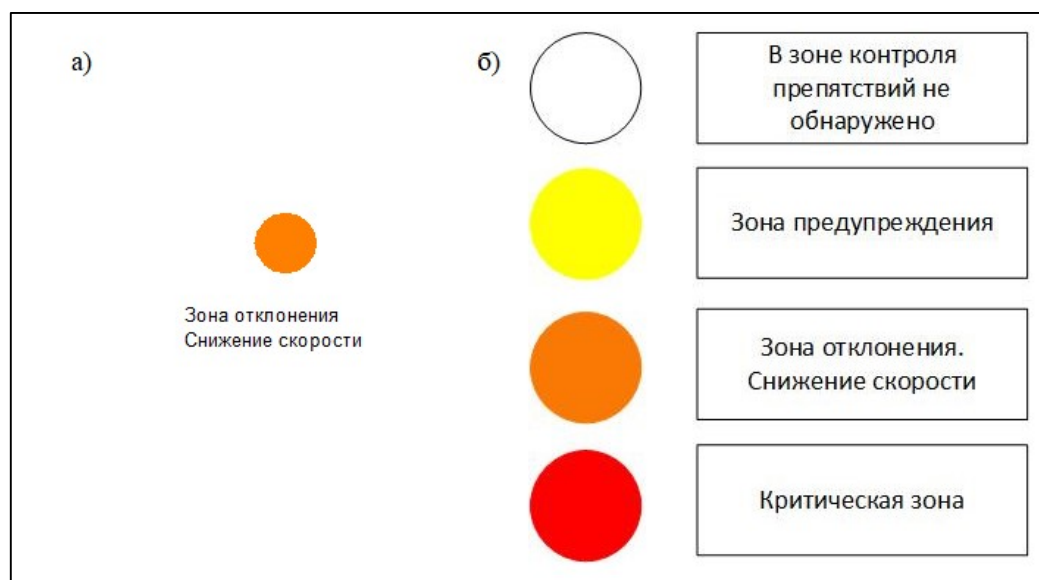


Рис.9. – Индикатор принятия решения в системе предупреждения столкновений: а) Цветовой индикатор в среде Matlab в точке с координатами (600;230); б) Варианты цветовой индикации используемого в модели индикатора принятия решения

Программный код реализации данной модели состоит из основного кода и ряда дополнительных кодов, которые реализуют построение карты, описывают первые элементы зон, визуализируют положение движущегося топливозаправщика [20,21].

В результате моделирования разработана система предупреждения столкновений сервисного транспортного средства на базе программной имитации сканирования лидара в среде Matlab. Было показано, что использование лидара в системе предупреждения столкновений является уместным решением для предотвращения столкновений. На базе представленной модели была сформирована зона контроля, в которой было выделено три области: зона предупреждения (на расстоянии 16 метров от транспортного средства до препятствия); оранжевая зона – зона отклонения (на расстоянии 6 метров), где система формирует команды для предотвращения столкновения; и критическая зона – зона, когда расстояние между транспортным средством и препятствием становится меньше 3 метров. В данной зоне осуществляется остановка движущегося транспорта и изменение его параметров движения: траектории и скорости.

Список источников

1. Бачкало Б.И. О новом подходе к созданию системы управления безопасностью полетов в государственной авиации Российской Федерации // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 39-41.
2. Кошкарров А.С., Семенова В.П. Основные подходы к автоматизации движения сервисных транспортных средств на территории аэродрома // 14-ая общероссийская

молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, 23-27 мая 2022): сборник трудов. - Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2022. С. 192-195.

3. Княжский А.Ю., Плясовских А.П. Цифровая модель движения на аэродроме // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 3. С. 96-106. DOI: 2542-0542-2020-3-96-106.

4. Уильям Райн Кларк. Новый ГАНП и взгляд в будущее. URL: <https://www.aviaport.ru/digest/2020/02/20/627387.html>

5. Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems // IEEE Signal Process, 2020, no. 37, pp. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615

6. Badrloo S., Varshosaz M., Pirasteh S., Li J. Image-based obstacle detection methods for the safe navigation of unmanned vehicles: a review // Trends, Innovative Developments and Disruptive Applications in UAV Remote Sensing, 2022, no. 14, pp. 3824.

7. Каменский К.В. Влияние траекторных неустойчивостей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)

8. Shenyu M., Yan Chang, Wenshuo Wang and Ding Zhao. An Optimal LiDAR Configuration Approach for Self-Driving Cars, 2009.

9. Авдеев В.А., Семенова В.П. Обоснование облика системы распознавания препятствия при маневрировании воздушного судна в аэропорту // Третья

Международная научная конференция «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии» (Санкт-Петербург, 14-22 апреля 2022): сборник докладов. – СПб.: ГУАП, 2022. С. 123-127. DOI: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3

10. Житков С.А., Ашурков И.С., Захаров И.Н., Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Методика обнаружения аэродинамической цели, движущейся по прямолинейной траектории в пространстве // Труды МАИ. 2019. №109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111392>. DOI: 10.34759/trd-2019-109-14

11. Долгов О.С., Сафоклов Б.Б. Проектирование технических моделей обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Московского авиационного института. 2022. № 1. С. 19-26. DOI: [10.34759/vst-2022-1-19-26](https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-19-26)

12. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением. – М.: Транспорт, 1992. - 279 с.

13. TractEasy Smart Airport Systems (SAS). URL: <https://www.smart-airport-systems.com/solutions/tracteasy/>

14. Бопп В.А. Роль лидара в современных транспортных средствах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 342-345.

15. Santiago R., Ballesta-Garcia M. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles // Applied Sciences, 2019, vol. 9(19), pp. 4093. DOI: [10.3390/app9194093](https://doi.org/10.3390/app9194093)

16. Кудряков С.А., Кульчицкий В.К., Пономарев В.В. Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь. - СПб.: Свое Издательство, 2016. - 287 с.
17. Дембицкий Н.Л., Луценко А.В., Фам В.А. Оптимизация выбора оборудования для производства бортовых радиотехнических комплексов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57879>
18. Гармаш В.Н., Коробочкин Д.М., Матвеев С.А., Петров Ю.В., Рудыка С.А., Сухов Т.М. Комплексование информации от разнородных источников в бортовых комплексах обеспечения поисково спасательных операций // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 139-146.
19. Семенов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде Matlab // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 8. С. 56-64. DOI: 10.17513/snt.36780
20. Мартяхин Д.С., Косцов А.В., Мартяхина Н.В. Исследование режимов движения транспорта и пешеходов на территории аэропортов // Вестник Московского информационно-технологического университета - Московского архитектурно-строительного института. 2019. № 2. С. 11-15.
21. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Современный подход к конструированию навигационных приборов // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87195>

References

1. Bachkalo B.I. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2015, no. 218, pp. 39-41.

2. Koshkarov A.S., Semenova V.P. *14-aya obshcherossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos»*: sbornik trudov, Saint-Petersburg, BGTU «Voenmekh» im. D.F. Ustinova, 2022, pp. 192-195.
3. Knyazhskii A.Yu., Plyasovskikh A.P. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2020, no. 3, pp. 96-106. DOI: 2542-0542-2020-3-96-106.
4. Uil'yam Rain Klark. *Novyi GANP i vzglyad v budushchee*. URL: <https://www.aviaport.ru/digest/2020/02/20/627387.html>
5. Li Y., Ibanez-Guzman J. Lidar for autonomous driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems, *IEEE Signal Process*, 2020, no. 37, pp. 50–61. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615
6. Badrloo S., Varshosaz M., Pirasteh S., Li J. Image-based obstacle detection methods for the safe navigation of unmanned vehicles: a review, *Trends, Innovative Developments and Disruptive Applications in UAV Remote Sensing*, 2022, no. 14, pp. 3824.
7. Kamenskii K.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168186>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-14
8. Shenyu M., Yan Chang, Wenshuo Wang and Ding Zhao. *An Optimal LiDAR Configuration Approach for Self-Driving Cars*, 2009.
9. Avdeev V.A., Semenova V.P. *Tret'ya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii»*: sbornik dokladov. Saint Petersburg, GUAP, 2022, pp. 123-127. DOI: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3

10. Zhitkov S.A., Ashurkov I.S., Zakharov I.N., Leshko N.A., Tsybul'nik A.N. *Trudy MAI*, 2019, no. 109. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111392>. DOI: 10.34759/trd-2019-109-14
11. Dolgov O.S., Safoklov B.B. *Aerospace MAI Journal*, 2022, no. 1, pp. 19-26. DOI: 10.34759/vst-2022-1-19-26
12. Anodina T.G., Kuznetsov A.A., Markovich E.D. *Avtomatizatsiya upravleniya vozdushnym dvizheniem* (Automation of air traffic control), Moscow, Transport, 1992, 279 p.
13. *TractEasy Smart Airport Systems (SAS)*. URL: <https://www.smart-airport-systems.com/solutions/tracteasy/>
14. Bopp V.A. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2022, no. 4, pp. 342-345.
15. Santiago R., Ballesta-Garcia M. An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles, *Applied Sciences*, 2019, vol. 9(19), pp. 4093. DOI:10.3390/app9194093
16. Kudryakov S.A., Kul'chitskii V.K., Ponomarev V.V. *Radiotekhnicheskoe obespechenie poletov vozdushnykh sudov i aviatsionnaya elektrosvyaz'* (Radio technical support of aircraft flights and aviation telecommunications), Saint Petersburg, Svoe Izdatel'stvo, 2016, 287 p.
17. Dembitskii N.L., Lutsenko A.V., Fam V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57879>
18. Garmash V.N., Korobochkin D.M., Matveev S.A., Petrov Yu.V., Rudyka S.A., Sukhov T.M. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 139-146.

19. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 8, pp. 56-64. DOI: 10.17513/snt.36780
20. Martyakhin D.S., Kostsov A.V., Martyakhina N.V. *Vestnik Moskovskogo informatsionno-tekhnologicheskogo universiteta - Moskovskogo arkhitekturno-stroitel'nogo instituta*, 2019, no. 2, pp. 11-15.
21. Evstifeev M.I., Eliseev D.P. *Trudy MAI*, 2017, no. 97. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87195>

Статья поступила в редакцию 06.12.2022

Одобрена после рецензирования 23.12.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 06.12.2022; approved after reviewing on 23.12.2022; accepted for publication on 27.02.2023