

4. Fot A. P. Sistema podgotovki kadrov vysshey kvalifikatsii v universitete [System of top skilled staff providing in university]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State University], 2009, no. 1, January, pp. 154–164.

УДК: 351.814.331.3

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ УТОЧНЕННОЙ 4D ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА

Новиков Павел Владимирович, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., 5, e-mail: novikovpavel90@gmail.com

Ривкин Андрей Маркович, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005, Российская Федерация, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., 5, e-mail: dr-on@mail.ru

Арутюнян Давид Ваграмович, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, 125493, Российская Федерация, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20А, корпус 5, e-mail: promtehaero@inbox.ru

В данной статье описывается алгоритм построения траектории полета воздушных средств (ВС) на всех этапах полета с учетом пересечения всех видов зон воздушного пространства, таких как секторы УВД, зоны ограничения, зоны опасных метеоявлений. Рассмотрены основные этапы 4D траектории воздушного судна, начиная от руления – перемещения ВС под действием тяги собственных двигателей и до пробега – замедляющегося движения самолёта по взлётно-посадочной полосе до полной остановки после приземления. Разработанный алгоритм можно применять при четырёхмерном планировании и организации полета воздушного средства на прямолинейном сегменте его курса, для использования его при расчете времени прибытия воздушного средства в пункт назначения, для более точной оценки количества истраченного топлива для выполнения полета по маршруту, а также при определении конфликтных ситуаций на маршруте полета.

Ключевые слова: 4D траектория, руление, разбег, набор высоты, полет на эшелоне, снижение, посадка, пробег, воздушное судно, фазы полета, положение точки

CLARIFYING A 4D ALGORITHM COVERING ALL PHASES OF AN AIRCRAFT'S FLIGHT PATH

Novikov Pavel V., undergraduate student, Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: novikovpavel90@gmail.com

Rivkin Andrey M., undergraduate student, Bauman Moscow State Technical University, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: dr-on@mail.ru

Arutyunyan David V., post-graduate student, The Moscow State Technical University of Civil Aviation, 20 Kronshtadtsky Blvd, A-493, GSP-3, Moscow, 125493, Russian Federation, e-mail: promtehaero@inbox.ru

The article presents a 4D algorithm covering all phases of an aircraft's flight path, including the intersection of air-space areas, air-traffic-control sectors, restricted zones, and zones of dangerous meteorological phenomena. The main stages of the 4D algorithm, the critique relates, would cover the aircraft's trajectory from taxiing-moving under its own power through running-moving on the runway prior to stoppage after final landing. The document suggests that the developed algorithm could be applied to establish a four-stage

flight planning and organizational segment dealing with course, estimated time-of-arrival (ETA) at the destination point, operational assessment of the quantity of fuel needed to cover the route, and prediction of potential conflicts en route.

Keywords: 4D trajectory, taxiing, takeoff, climb, flight, reduction, planting, mileage, aircraft, phases of flight, point position

Введение

Актуальность создания автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД) определяет необходимость дальнейшего развития и совершенствования методик расчета 4D траекторий воздушных средств (ВС) по данным плана полета. Повышение достоверности такого расчета является актуальной задачей, поскольку результаты расчета используются в задачах распределения плановой информации по диспетчерским рабочим местам, а в системах планирования – для определения загрузок секторов АС УВД и других элементов воздушного пространства. Дополнительную ценность 4D траектории ВС представляет наложение рассчитанной траектории с моделью воздушного пространства, содержащей опасные метеопроявления и прочие опасные зоны ограничений [1–5].

При проведении расчетов 4D траектории полета принято рассматривать в последовательном прохождении следующие фазы [5]:

- 1) руление;
- 2) разбег;
- 3) набор высоты до занятия запрошенного эшелона;
- 4) полет на эшелоне;
- 5) снижение до точки входа в глиссаду;
- 6) посадка;
- 7) пробег.

Входными данными для расчета траектории полета служат траектория полета воздушного судна, заданная в виде массива координат точек, через которые воздушное судно должно проложить свой маршрут, информация о типе судна, его взлетной массе, скорости полета, скорости набора и снижения высоты, посадочная скорость, параметры взлетно-посадочных полос, значение скорости ветра на всей траектории полета, координаты всех зон ограничений [4].

В данной работе основное внимание уделяется расчёту траектории именно при полете на эшелоне, определяющем основное время полета по всей траектории.

Постановка задачи. Для решения проблемы высокой загруженности авиалиний используются системы планирования воздушного движения, моделирующие полеты воздушных судов. В работе предложены математические модели описания траектории полета на всех участках движения воздушного судна с учетом его технических характеристик и пересечений со всеми типами зон описания аэронавигационной информации, которые обеспечивают решение вышеуказанной проблемы путем наиболее точного моделирования планируемой воздушной обстановки и выявлением пересечений траектории полета с опасными зонами и зонами ограничений.

Цель работы – необходимо разработать математические модели описания траектории полета на всех участках движения воздушного судна с учетом его технических характеристик и пересечений со всеми типами зон описания аэронавигационной информации.

Научная новизна предлагаемых решений заключается в предложенных математических моделях для описания 4D траектории воздушных судов на всех этапах полета, а также алгоритме поиска пересечений траектории полёта со всеми типами зон.

Результаты работы позволяют применить предложенные математические модели и алгоритмы при построении системы планирования воздушного движения нового поколения

ния, в которых учитываются зоны ограничений, а также рассчитывается 4D положение воздушных судов в любой момент времени.

Областью применения полученных результатов является ряд задач по разработке систем организации планирования воздушного движения нового поколения для снижения перегрузок авиалиний, увеличения точности прогнозирования обстановки воздушного движения и, как следствие, снижения числа аварийных ситуаций.

Анализ фаз 4D траектории полета

Полет воздушного средства состоит из нескольких этапов. Это руление, разбег, набор высоты, полет на эшелоне, снижение, посадка, пробег [5].

Расчет 4D траектории – это вычисление времени прохождения ВС последовательных точек маршрута и соответствующих высот от начала до окончания полета на основании данных плана полета [3].

Руление – это перемещение ВС под действием тяги собственных двигателей [5].

Разбег – это начальный период взлета, представляющий собой ускоренное движение ВС по ВПП, необходимое для приобретения такой скорости, при которой крыло создает подъемную силу, способную оторвать ВС от Земли [5].

Набор высоты – это этап полета, на котором происходит существенное увеличение высоты [5].

Полет на эшелоне – это движение в воздухе на условной высоте, рассчитанной при стандартном давлении и отстоящей от других высот на величину установленных интервалов [6, 7].

Снижение – это этап полета, на котором происходит существенное уменьшение высоты полета [5].

Посадка – это этап полета, в котором летательный аппарат возвращается на Землю [5].

Пробег – это замедляющееся движение самолета по взлетно-посадочной полосе до полной остановки после приземления или принятия пилотом решения о прекращении разбега на взлете [5].

Рассмотрим данные факторы по отдельности подробнее.

Методики расчета 4D траекторий воздушных средств (ВС) по данным плана полета

Руление – для определения времени руления ВС до взлетно-посадочной полосы необходимо знать тип ВС или его максимальную взлетную массу, или его категорию, затем при помощи статистических данных по данному аэродрому возможно определить достаточно точное время руления ВС [1–7]. Данный алгоритм представлен на рис. 1 [7].

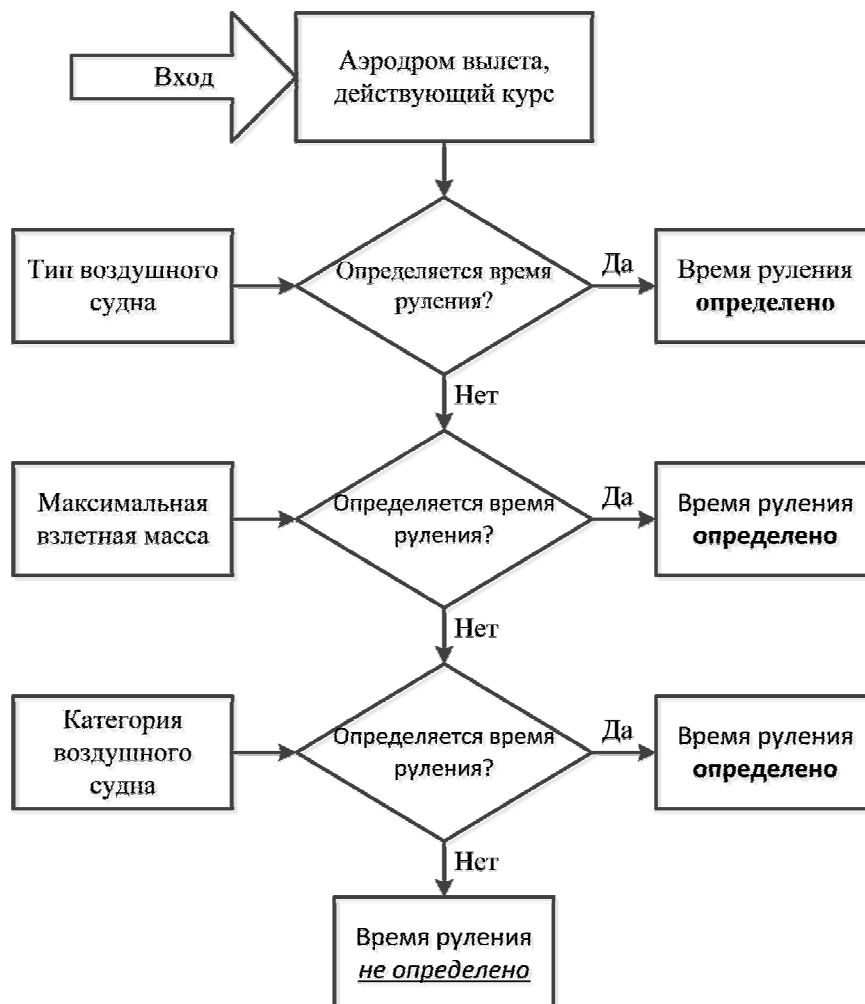


Рис. 1. Алгоритм определения времени руления

Согласно данному алгоритму время руления в основном зависит только от воздушного судна и длины до взлетно-посадочной полосы (ВПП) конкретного аэродрома, поэтому 4D траектория на данном этапе является постоянной и не претерпевает изменений.

Разбег – для определения времени разбега по ВПП необходимо знать скорость отрыва ВС от полосы и длину ВПП. Скорость отрыва ВС определяется для типов ВС, а также является сравнительно постоянной для категории, к которой относится ВС [7].

Алгоритм на рис. 2 показывает последовательность действий, благодаря которым возможно определить необходимые параметры для расчетов.

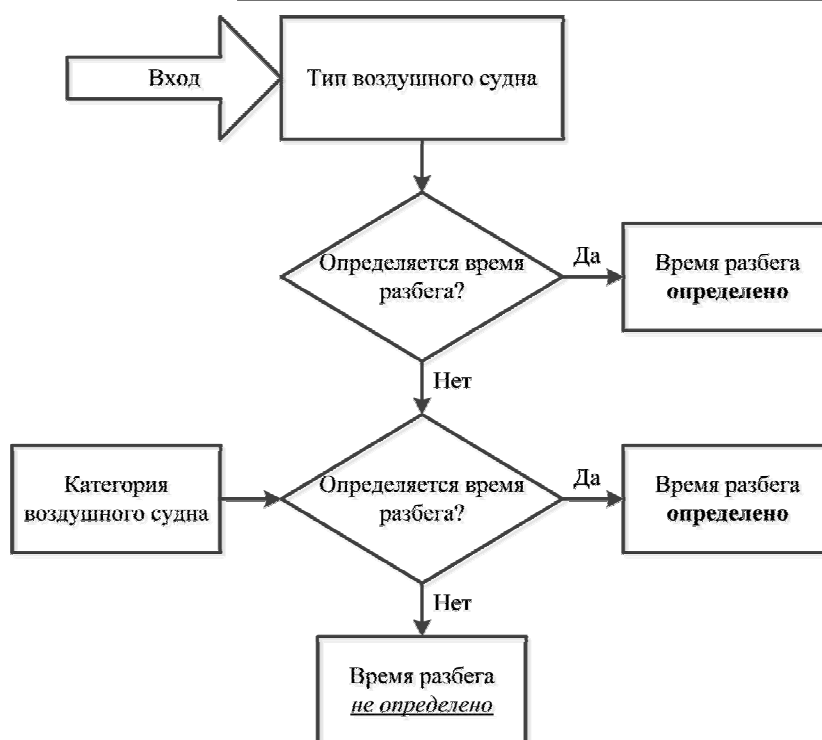


Рис. 2. Алгоритм определения скорости отрыва

После того как скорость отрыва ВС от ВПП определена, возможно определить время, затрачиваемое для разбега по ВПП, считая движение равноускоренным. При таком типе движения время рассчитывается согласно следующей формуле:

$$t_{\text{разб}} = \frac{2 \cdot l_{\text{разб}}}{V_{\text{отр}}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{разб}}$ – время разбега; $l_{\text{разб}}$ – длина ВПП; $V_{\text{отр}}$ – скорость отрыва.

Набор высоты – скорость набора высоты ВС зависит от текущей высоты, на которой находится ВС. Поэтому для уточнения времени требуемого для набора высоты можно разбить траекторию набора высоты на участки, где возможно считать скорость набора высоты постоянной (рис. 3) [7].

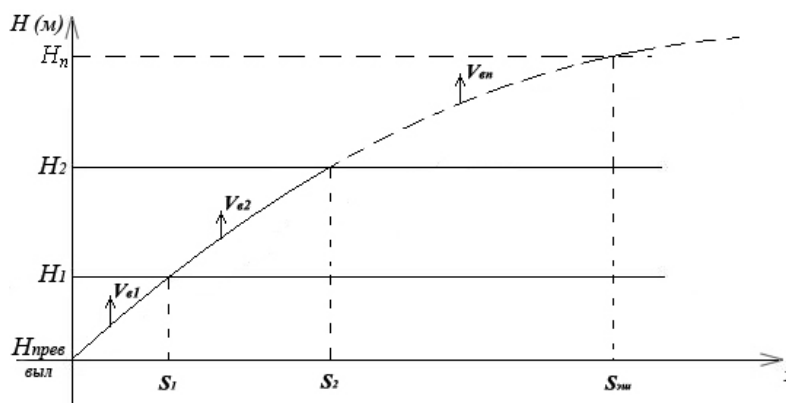


Рис. 3. Участки набора высоты

Алгоритм на рис. 4 показывает последовательность действий, благодаря которым возможно определить необходимые параметры для расчетов.

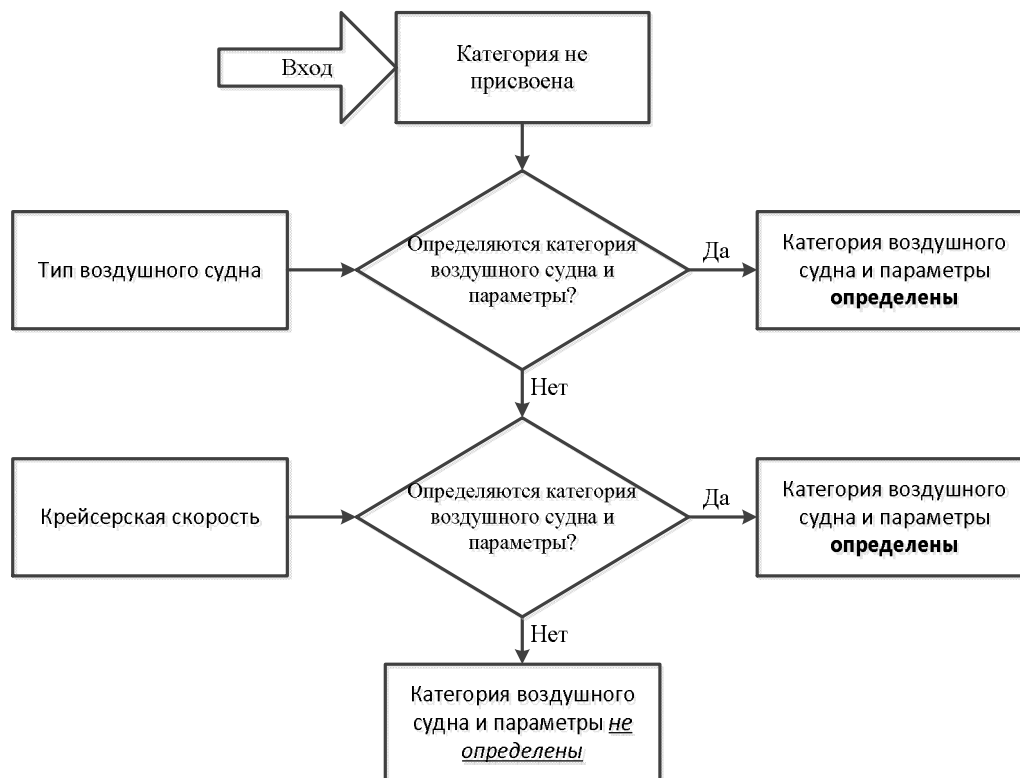


Рис. 4. Алгоритм определения скорости набора высоты

Затраченное время, как и равномерное движение, можно рассчитать по следующей формуле:

$$t_{\text{наб}} = \frac{H_1 - H_{\text{прев.выл.}}}{V_{B1}} + \frac{H_2 - H_1}{V_{B2}} + \dots + \frac{H_3 - H_2}{V_{B3}} \quad (2)$$

А удаление от аэропорта рассчитывается по следующей формуле:

$$S_{\text{эш}} = \frac{t_1(V_{\text{отр}} + V_1)}{2} + \frac{t_2(V_1 + V_2)}{2} + \dots + \frac{t_n(V_{n-1} + V_{\text{крейс}})}{2} \quad (3)$$

Полет на эшелоне – для расчета полета на эшелоне необходимо иметь информацию о траектории полета и крейсерской скорости судна. Траекторию полета возможно задать в виде массива географических координат, через которые должно пройти воздушное судно. Участие между точками можно считать прямолинейными (рис. 5) [6].

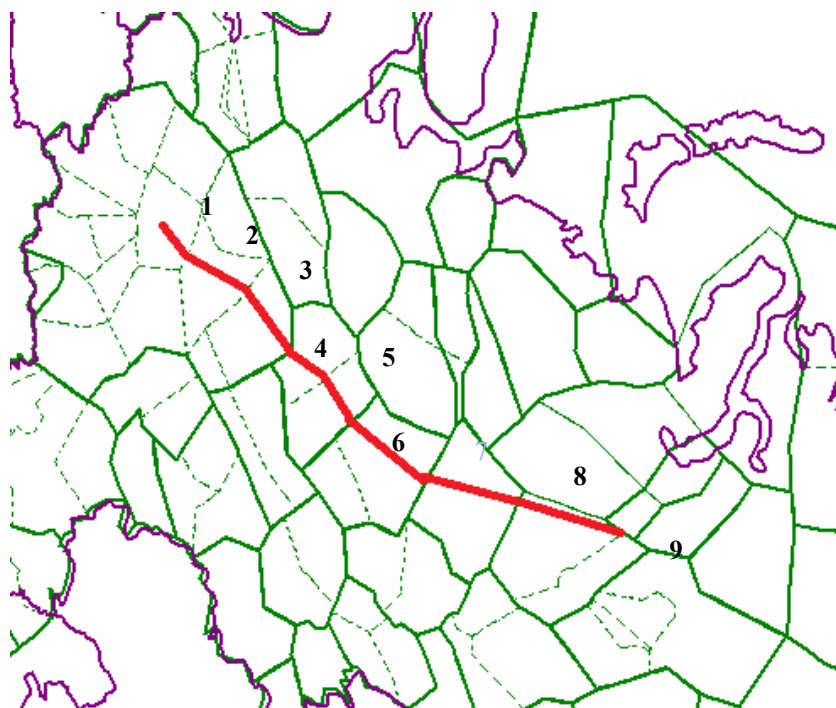


Рис. 5. Траектория полета ВС

Как можно заметить из рис. 5, зоны УВД имеют форму многоугольников. Для нахождения точек пересечения траектории полета ВС с границами зон УВД необходимо решить геометрическую задачу нахождения точек пересечения прямой и многоугольника, однако сначала необходимо проверить, пересекаются ли данная прямая и многоугольник.

Для определения пересечения границы секторов и траектории необходимо, чтобы последовательные точки траектории находились в разных секторах. Для этого решим задачу нахождения принадлежности точки сектору (рис. 6, 7).

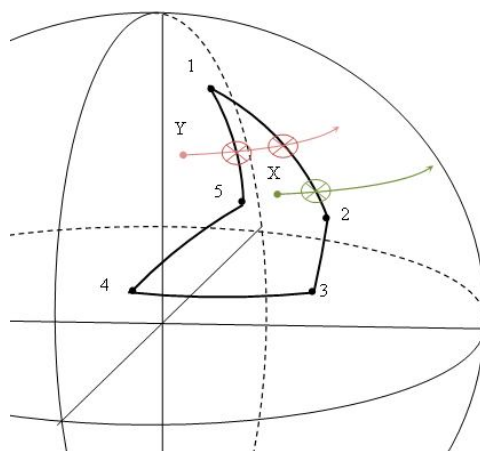


Рис. 6. Определение принадлежности точки сектору



Рис. 7. Алгоритм определения принадлежности точки сектору

Из точки X в восточном направлении проводится луч на сфере, проходящий по параллели, пересекающей точку X . Определяется количество точек пересечения луча с границей многоугольника. Если количество точек пересечения луча с границей нечетно, то выбранная точка принадлежит области многоугольника (точка X). Если количество точек пересечения луча с границей четно, то выбранная точка не принадлежит области многоугольника (точка Y).

Если требуется определить принадлежность точки X границам многоугольника, то достаточно организовать проверку на принадлежность точки X одному из отрезков, составляющих границу многоугольника.

В случае если последовательно две точки принадлежат различным секторам, то необходимо найти точку пересечения двух прямых. Одна из прямых – прямая на траектории движения ВС, в качестве второй необходимо последовательно перебрать все прямые, ограничивающие сектор, и найти точку их пересечения.

На рис. 8 точка Z является точкой пересечения траектории полета и границы секторов. Прямая XU является прямолинейным отрезком траектории полета. Точка X лежит в одном секторе, а точка Y находится в другом, поэтому присутствует точка пересечения, координаты которой можно найти, решив систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + C_1 = 0 & \text{— прямая траектории полета ВС} \\ A_2 \cdot x + B_2 \cdot y + C_2 = 0 & \text{— прямая границы сектора} \end{cases} \quad (4)$$

Однако в случае если в траектории полета присутствуют протяженные прямолинейные участки, то возможно появление ситуации, когда сектор будет находиться между двумя точками траектории полета и данный метод не найдет точек пересечения. Для решения данной проблемы можно разбить протяженные участки траектории полета на меньшие сегменты и искать пересечения с мельчайшими сегментами. Благодаря такому подходу и при сравнительно мелком шаге разбиения траектории полета можно определить пересечения со всеми типами секторов, влияющих на полет данного ВС, однако при автоматизации данного процесса возможно резкое снижение производительности системы [7]. Поэтому следует выбирать шаг разбиения сегментов немного меньшим, чем мельчайшие объекты в модели воздушного пространства.

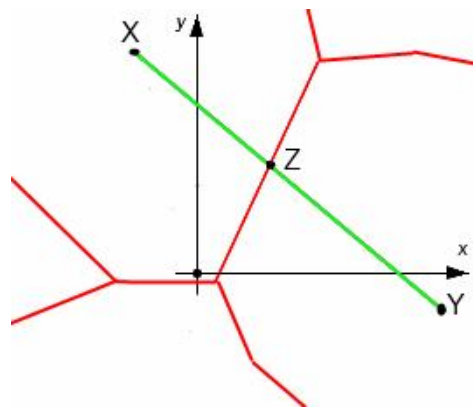


Рис. 8. Пересечение границы секторов траекторией

Снижение – при условии, что вертикальная скорость не изменяется, время, которое требуется на преодоление расстояния от точки начала снижения до точки входа в глиссаду, можно рассчитать по следующей формуле:

$$t_{\text{сниж}} = \frac{H_{\text{эш}} - H_{\text{прев.пос}} - H_{\text{глис}}}{V_{\text{верт.пос}}}, \quad (5)$$

где $H_{\text{глис}}$ – высота глиссады; $H_{\text{эш}}$ – крейсерский эшелон; $H_{\text{прев.пос}}$ – превышение аэродрома посадки; $t_{\text{сниж}}$ – время, необходимое для снижения до высоты глиссады (учитывая, что в горизонтальной плоскости движение равнозамедленное); $V_{\text{верт.пос}}$ – вертикальная скорость при снижении.

От точки выхода на глиссаду точка начала снижения будет находиться на удалении согласно следующей формуле:

$$S_{\text{нач.сн}} = \frac{t_{\text{сниж}}(V_{\text{крейс}} + V_{\text{вх.гл}})}{2} \quad (6)$$

Посадка – на глиссаде скорость постоянна до касания полосы. Для расчета времени пролета глиссады необходимо иметь информацию о скорости полета по глиссаде, т.е. посадочной скорости (скорость ВС при касании полосы) для каждого типа ВС, а также о высоте и угле наклона глиссады каждого отдельного аэродрома (для каждого курса).

На этапе полета по глиссаде для расчета используется горизонтальная скорость (вертикальная не учитывается) и, соответственно, проекция глиссады на поверхность Земли. Для расчета длины глиссады и времени ее пролета можно использовать следующие формулы:

$$S_{\text{гл}} = \frac{H_{\text{гл}}}{\text{tg}\alpha_{\text{накл.гл}}}; \quad (7)$$

$$T_{\text{гл}} = \frac{S_{\text{гл}}}{V_{\text{пос}}}. \quad (8)$$

Пробег – для расчета времени пробега по ВПП необходимо иметь информацию о посадочной скорости и длине пробега, которые являются постоянными для ВС и определяются из его ЛТХ, а также являются сравнительно постоянными для категории ВС.

Учитывая, что движение ВС по полосе является равнозамедленным, рассчитывается время пробега:

$$t_{\text{проб}} = \frac{2l_{\text{проб}}}{V_{\text{пос}}}, \quad (9)$$

где $l_{\text{проб}}$ – длина пробега; $V_{\text{пос}}$ – посадочная скорость (она же скорость касания полосы).

Заключение

В данной работе рассмотрен алгоритм расчета полета ВС на всех его этапах. Основное внимание уделено определению точек пересечения траектории полета со всеми типами секторов, благодаря чему возможно определить на этапе планирования наличие пересечений с зонами ограничений и зонами опасных метеопроявлений. Кроме того, благодаря наиболее точному расчету полета ВС можно точнее спрогнозировать время полета и предпринять меры по предотвращению конфликтных ситуаций, ведущих к задержкам рейсов и даже аварийным ситуациям.

Результатами работы являются предложенные математические модели описания всех этапов движения воздушного судна и алгоритмы нахождения пересечений со всеми типами зон.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем организации планирования воздушного движения нового поколения, для снижения перегрузок авиалиний, увеличения точности прогнозирования обстановки воздушного движения и, как следствие, снижения числа аварийных ситуаций.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ № 12-07-31151 в рамках программы «Мой первый грант».

Список литературы

1. Бугров Я. С. Высшая математика / Я. С. Бугров, С. М. Никольский. – Москва : Дрофа, 2004. – Т. 1. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. – 288 с.
2. Власов А. И. Архитектура корпоративной многоагентной автоматизированной системы фильтрации информационных потоков / А. И. Власов, И. Г. Цыганов // Информационные технологии. – 2005. – № 1. – С. 34–41.
3. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 г. № 60-ФЗ.
4. Новиков П. В. Алгоритм высокоточных вычислений метеодобавки скорости ветра для участка полета воздушного средства / П. В. Новиков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 11. – С. 5. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17105440> (дата обращения 12.02.2012), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Производство полетов воздушных судов. – Международная организация гражданской авиации (ИКАО), 2006. – 386 с.

6. Ривкин А. М. Модель полета воздушных судов на эшелоне / А. М. Ривкин // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 11. – С. 15. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17105440> (дата обращения 12.02.2012), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.

7. Федеральные авиационные правила полетов в воздушном пространстве Российской Федерации // Приказ Министра обороны Российской Федерации, Министерства транспорта Российской Федерации, Российского авиационно-космического агентства от 31 марта 2002 г. № 136/42/51. – 102 с.

References

1. Bugrov Ya. S., Nikolskiy S. M. *Vysshaya matematika* [Higher mathematics]. Moscow, Drofa, 2004. Т. 1. Elementy lineynoy algebry i analiticheskoy geometrii [Vol. 1. Elements of linear algebra and analytic geometry]. 288 p.

2. Vlasov A. I., Tsyganov I. G. Arhitektura korporativnoy mnogoagentnoy avtomatizirovannoy sistemy filtratsii informatsionnykh potokov [Architecture of corporate multiagent automated system of information flow filtration]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2005, no. 1, pp. 34–41.

3. *Vozdushnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Air Code of the Russian Federation] of 19.03.1997 no. 60-FL.

4. Novikov P. V. Algoritm vysokotochnykh vychisleniy metodeobavki skorosti vetra dlya uchastka poleta vozduzhnogo sredstva [Algorithm of precise calculations of wind speed meteorpart for flight section of air facility]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2012, no. 11, p. 5. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17105440> (accessed 12 February 2012).

5. *Proizvodstvo poletov vozduzhnykh sudov* [Aircraft operations]. International Civil Aviation Organization (ICAO), 2006. 386 p.

6. Rivkin A. M. Model poleta vozduzhnykh sudov na eshelone [The model of aircraft flight at the flight level]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2011, no. 11, p. 15. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17105440> (accessed 12 February 2012).

7. Federalnye aviatsionnye pravila poletov v vozduzhnom prostranstve Rossiyskoy Federatsii [Federal aviation regulations in airspace of the Russian Federation]. *Prikaz Ministra oborony Rossiyskoy Federatsii, Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii, Rossiyskogo aviatsionno-kosmicheskogo agentstva* [Order of the Minister of Defence, the Ministry of Transport of the Russian Federation, the Russian Aviation and Space Agency] of March 31, 2002, no. 136/42/51. 102 p.

УДК 658.262

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ЗАЯВОК НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

Денисов Артем Руфимович, доктор технических наук, Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова, 156961, Российская Федерация, г. Кострома, ул. 1 Мая, 16, e-mail: inf_service@ksu.edu.ru

Левин Михаил Григорьевич, доктор технических наук, Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова, 156961, Российская Федерация, г. Кострома, ул. 1 Мая, 16, e-mail: inf_service@ksu.edu.ru

Рыбинский Алексей Владимирович, аспирант, Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова, 156961, Российская Федерация, г. Кострома, ул. 1 Мая, 16, e-mail: inf_service@ksu.edu.ru

Некрасова Татьяна Николаевна, аспирант, Костромской государственной университет имени Н.А. Некрасова, 156961, Российская Федерация, г. Кострома, ул. 1 Мая, 16, e-mail: inf_service@ksu.edu.ru

Определяется необходимость внедрения в распределительных сетевых компаниях системы поддержки принятия решений по управлению бизнес-процессом выполнения работ по технологиче-