

УДК: 629.7.07

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-22-31

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАФИКОМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ, СЛЕДУЮЩИХ В АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЕ НА ПОСАДКУ

И.Б. ИВЕНИН¹, А.С. КУРИЛЁНОК²

¹ *Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем
(государственный научный центр Российской Федерации),*

г. Москва, Россия

² *Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Предлагается методический подход к оптимизации управления потоком воздушных судов, прибывающих в аэродромную зону для выполнения посадки. Моделируется аэродром, имеющий две параллельные взлетно-посадочные полосы, способные работать независимо друг от друга. Входящий поток воздушных судов описывается пуассоновским потоком случайных событий. Прибывающие воздушные суда распределяются диспетчером между двумя взлетно-посадочными полосами, траектории (схемы) захода на которые имеют различную длину, общую начальную точку и не имеют пересечений. Для каждой из двух схем захода диспетчером задается средняя скорость движения воздушных судов. Приведенная модель аэродрома аэродромной зоны рассматривается как двухканальная система массового обслуживания с отказами. Каждый из двух обслуживающих приборов включает в себя схему захода, глиссаду и взлетно-посадочную полосу. Обслуживающий прибор может находиться в одном из двух состояний – свободном и занятом, вероятности которых описываются системой дифференциальных уравнений Колмогорова. Критерием оценки качества функционирования системы служит количество отказов в обслуживании на исследуемом интервале времени, описываемое интегральным функционалом. Оптимизационная задача сводится к нахождению доставляющих минимум критериальному функционалу значений управляющих параметров – функций, описывающих распределение входящего потока воздушных судов между схемами захода и средние скорости их движения. Для решения сформулированной оптимизационной задачи применяется принцип максимума Л.С. Понтрягина. Приводится вид функции Гамильтона и сопряженной системы дифференциальных уравнений. Структура оптимального управления исследована для двух различных случаев ограничений на управление распределением входящего потока воздушных судов. Выявлены закономерности влияния управляющих параметров на критериальный функционал.

Ключевые слова: оптимальное управление, оптимизация, принцип максимума Понтрягина, воздушное движение, управление воздушным движением, моделирование воздушного движения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с постоянным увеличением интенсивности воздушного движения все большее внимание уделяется поиску путей повышения пропускной способности аэропортов. Этой теме посвящены многие исследования, основанные на детальном аналитическом [1], имитационном [2, 3] и гибридном [4] моделировании взаимосвязанного движения воздушных судов (ВС) и процессов управления воздушным движением (УВД). Результаты этих исследований показывают, что пропускную способность аэропорта ограничивают не только возможности взлетно-посадочной полосы (ВПП), но и риски возникновения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве [5, 6, 7]. Важными аспектами исследования безопасности воздушного движения в районе аэродромов являются оптимизация управления ВС [8] и моделирование взаимодействия ВС со спутными следами [9, 10]. Если интерпретировать все средства и службы аэропорта как управляемую систему массового обслуживания ВС, то задачу повышения пропускной способности можно рассматривать как задачу оптимального управления трафиком ВС в аэродромной зоне. В данной работе рассматривается частная задача управления трафиком ВС, следующих в аэродромной зоне на посадку.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В целях разработки методики оптимизации трафика ВС рассмотрим модель аэродромной зоны, включающую в себя две параллельно расположенных взлетно-посадочных полосы, заход на посадку на которые осуществляется по двум непересекающимся траекториям $T_{ЗАХ1}$ и $T_{ЗАХ2}$, имеющим общую начальную точку. Длины указанных траекторий равны L_1 и L_2 соответственно. Конфигурация схем захода приведена на рисунке 1.

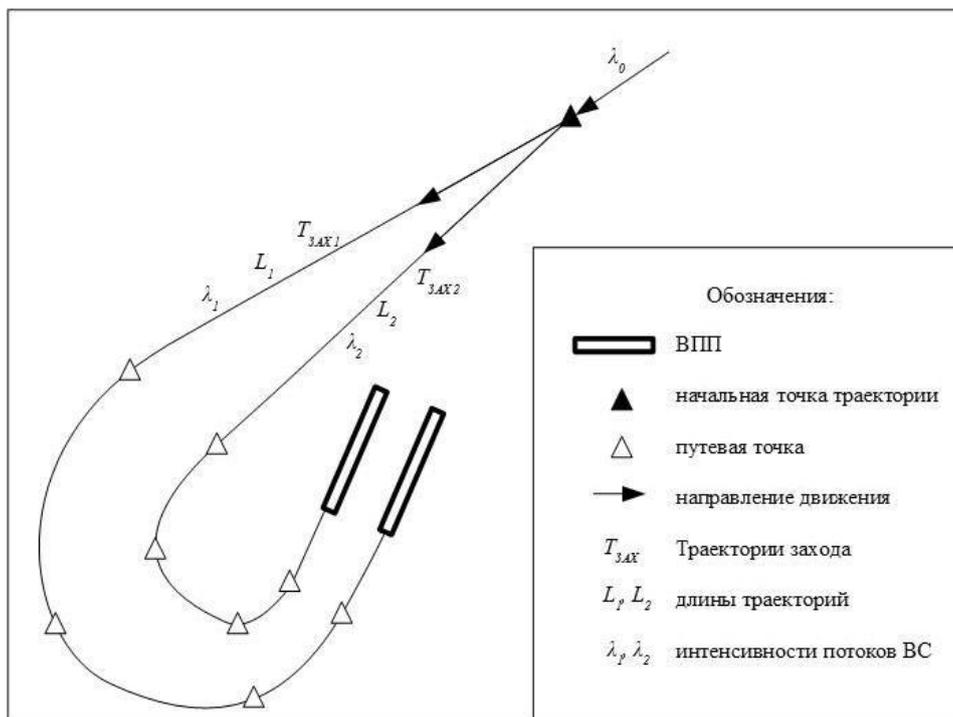


Рис. 1. Конфигурация схем захода
 Fig. 1. Approach flight paths configuration

В аэродромную зону прибывает поток следующих на посадку воздушных судов, разделяемый диспетчером в начальной точке траекторий захода на два потока. Будем считать, что обе ВПП могут работать одновременно, и после разделения потоки заходящих на посадку воздушных судов не взаимодействуют между собой.

Опишем рассматриваемую нами модель в терминах теории массового обслуживания. Структура соответствующей системы массового обслуживания показана на рис. 2.

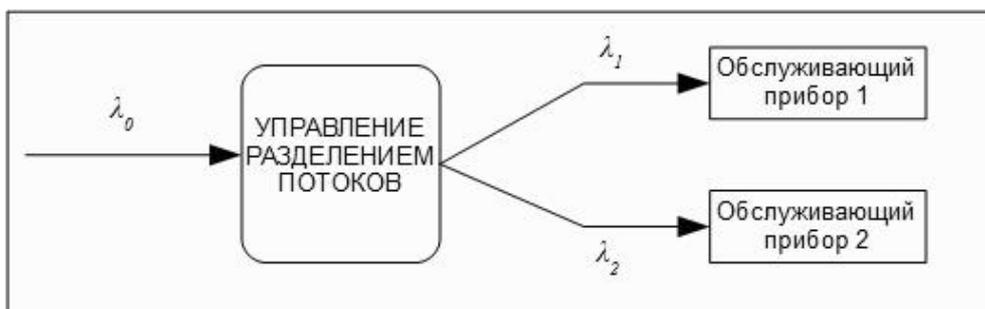


Рис. 2. Структура системы массового обслуживания
 Fig. 2. Mass service system structure

Обслуживающий прибор агрегирует в себе процессы движения ВС по траектории захода на посадку, глиссаду и движение по ВПП. Управляемыми параметрами (управлениями) являются распределение входящего потока (трафик ВС) и скорость воздушных судов при следовании на посадку. Предполагается, что управлением скоростью ВС можно достичь выравнивания трафика ВС, выходящих на глиссаду, и избежать конфликтных ситуаций.

Сделаем допущение о пуассоновском распределении входящего потока воздушных судов с интенсивностью λ_0 . Управление разделением потоков входящих ВС подчиняется следующим правилам:

$$\begin{cases} \lambda_1 = U_1 \lambda_0 \\ \lambda_2 = U_2 \lambda_0 \\ U_1 + U_2 = 1. \\ U_1 \geq 0 \\ U_2 \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Опишем далее управление скоростью воздушных судов, следующих на посадку. Пусть μ_i – интенсивность обслуживания поступающих ВС i -м обслуживающим прибором, определяемая выражением

$$\mu_i = \frac{1}{t_{\text{обс}i} + \tau_i}, \quad (2)$$

где $\tau_i = \frac{L_i}{V_i} \in \left[\frac{L}{V_{\max i}}, \frac{L}{V_{\min i}} \right]$ – время, требуемое для выполнения захода на посадку, $i=1,2$ – номер ВПП и соответствующей ей траектории захода на посадку, V_i – средняя скорость движения самолетов по i -й схеме захода на посадку, $V_{\max i}$ – максимальная допустимая скорость при выполнении захода, $V_{\min i}$ – минимальная допустимая скорость при выполнении захода, $t_{\text{обс}i}$ – время, требуемое для выполнения посадки от момента выхода ВС на глиссаду.

Изменение времени обслуживания ВС производится через регулирование средних скоростей их движения для каждой из схем захода.

Обслуживающий прибор может находиться в одном из двух состояний – свободном и занятом. В первом случае выполнение захода прибывшего ВС на посадку по выбранной схеме с соблюдением норм пространственного и временного эшелонирования возможно, во втором – нет. Обозначим через $P_{i,0}$ вероятность свободного состояния i -го обслуживающего прибора, через $P_{i,1}$ – вероятность того, что прибор занят. Интенсивности перехода между свободным и занятым состоянием обслуживающих приборов соответствуют значениям λ_i и μ_i (рис. 3).

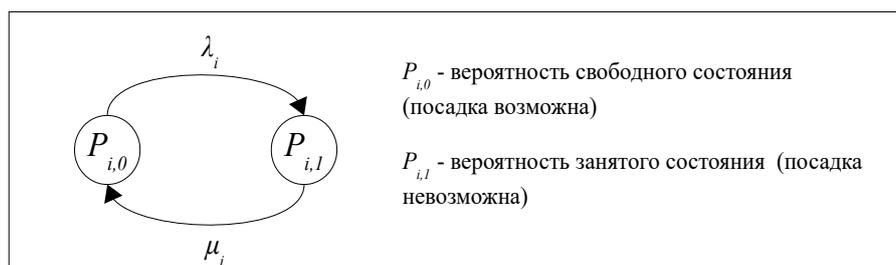


Рис. 3. Вероятности состояний обслуживающих приборов
Fig. 3. Probabilities of servicing units conditions

Система дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний траекторий захода на посадку имеет вид

$$\begin{cases} \dot{P}_{1,0} = -\lambda_1 P_{1,0} + \mu_1 P_{1,1}; \\ \dot{P}_{1,1} = \lambda_1 P_{1,0} - \mu_1 P_{1,1}; \\ \dot{P}_{2,0} = -\lambda_2 P_{2,0} + \mu_2 P_{2,1}; \\ \dot{P}_{2,1} = \lambda_2 P_{2,0} - \mu_2 P_{2,1}. \end{cases} \quad (3)$$

Критерием качества функционирования описанной системы массового обслуживания является количество необслуженных ВС за контрольный промежуток времени, определяемое критериальным функционалом:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [\lambda_1 P_{1,1} + \lambda_2 P_{2,1}] dt, \quad (4)$$

где t_0 и t_1 – соответственно начальный и конечный момент моделируемого периода времени.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Для поиска оптимальных управлений $U_1^*, U_2^*, V_1^*, V_2^*$ воспользуемся принципом максимума Л.С. Понтрягина, в соответствии с которым оптимальные управления, минимизирующие функционал (4) должны доставлять максимальное значение функции Гамильтона – Понтрягина:

$$H = \sum_{i=0}^4 \psi_i f_i, \quad (5)$$

где ψ_i – функции сопряженной системы дифференциальных уравнений, $f_0 = \lambda_1 P_{1,1} + \lambda_2 P_{1,2}$ – подынтегральная функция критериального функционала.

Функция Гамильтона – Понтрягина может быть записана в развернутом виде:

$$\begin{aligned} H = & U_1 [-\lambda_0 P_{1,1} - \lambda_0 P_{1,0} \psi_1 + \lambda_0 P_{1,0} \psi_2] + U_2 [-\lambda_0 P_{2,1} - \lambda_0 P_{2,0} \psi_3 + \lambda_0 P_{2,0} \psi_4] + \\ & + \frac{1}{t_{обс1} + \frac{L_1}{V_1}} [P_{1,1} \psi_1 - P_{1,1} \psi_2] + \frac{1}{t_{обс2} + \frac{L_2}{V_2}} [P_{2,1} \psi_3 - P_{2,1} \psi_4]. \end{aligned} \quad (6)$$

Сопряженная система дифференциальных уравнений принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_1 = \frac{\partial H}{\partial P_{1,0}} = -\lambda_1 \psi_1 + \lambda_1 \psi_2; \\ \psi_2 = \frac{\partial H}{\partial P_{1,1}} = -\lambda_1 + \mu_1 \psi_1 - \mu_1 \psi_2; \\ \psi_3 = \frac{\partial H}{\partial P_{2,0}} = -\lambda_2 \psi_3 + \lambda_2 \psi_4; \\ \psi_4 = \frac{\partial H}{\partial P_{1,0}} = -\lambda_2 + \mu_2 \psi_3 - \mu_2 \psi_4. \end{array} \right. \quad (7)$$

Найдем структуру оптимального управления исходя из условия максимума гамильтониана:

$$[U_1^*, U_2^*, V_1^*, V_2^*] = \arg \sup_{U, V} H(P, \psi, U, V). \quad (8)$$

Ввиду линейности гамильтониана по управлениям U_1 и U_2 задача отыскания оптимального управления распределением потоков имеет решение «релейного» вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1^* = 1 \\ U_2^* = 0 \end{array} \right., \text{ если } -\lambda_0 P_{1,1} - \lambda_0 P_{1,0} \psi_1 + \lambda_0 P_{1,0} \psi_2 < -\lambda_0 P_{2,1} - \lambda_0 P_{2,0} \psi_3 + \lambda_0 P_{2,0} \psi_4,$$

и

$$\left\{ \begin{array}{l} U_1^* = 0 \\ U_2^* = 1 \end{array} \right., \text{ если } -\lambda_0 P_{1,1} - \lambda_0 P_{1,0} \psi_1 + \lambda_0 P_{1,0} \psi_2 \geq -\lambda_0 P_{2,1} - \lambda_0 P_{2,0} \psi_3 + \lambda_0 P_{2,0} \psi_4. \quad (9)$$

Для определения структуры оптимального управления скоростью необходимо решить систему алгебраических уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H}{\partial V_1} = \frac{(P_{1,1} \psi_1 - P_{1,1} \psi_2) L_1}{\left(t_1 + \frac{L_1}{V_1}\right)^2 V_1^2} = 0; \\ \frac{\partial H}{\partial V_2} = \frac{(P_{2,1} \psi_3 - P_{2,1} \psi_4) L_2}{\left(t_2 + \frac{L_2}{V_2}\right)^2 V_2^2} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

при выполнении условий $V_i \in [V_{\min i}, V_{\max i}]$.

Равенство (10) выполняется при выполнении любого из условий (11)–(13):

$$P_{i,1} = 0, \quad (11)$$

$$L_i = 0, \quad (12)$$

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ или } \psi_3 = \psi_4, \quad (13)$$

при этом очевидно, что выполнение равенства (10) не может быть достигнуто каким-либо значением средней скорости движения самолетов V_i . Значение гамильтониана увеличивается с ростом V_i и достигает максимума при $V_i^* = V_{\max i}$, как показано на рис. 4 для частного случая.

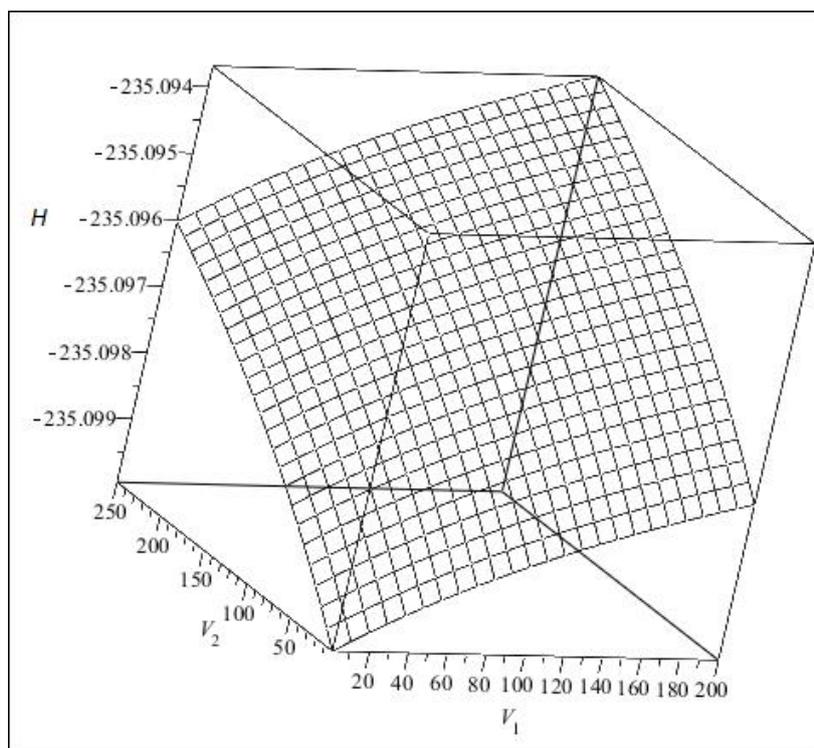


Рис. 4. Пример зависимости гамильтониана от средних скоростей
Fig. 4. Example of dependence of a Hamiltonian on average approach speed

Рассмотрим теперь случай, когда ограничения на управление распределением потоков имеют вид

$$\begin{cases} U_1 + U_2 \leq 1; \\ 0 \leq U_1 \leq 1; \\ 0 \leq U_2 \leq 1; \\ \lambda_0 U_1 \leq \lambda_{огр1}; \\ \lambda_0 U_2 \leq \lambda_{огр2}. \end{cases} \quad (14)$$

Ограничение интенсивностей потоков ВС на каждой из схем захода обеспечивает соблюдение норм пространственного и временного эшелонирования для заходящих на посадку ВС при высокой интенсивности входящего потока ВС λ_0 . Вид системы дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний (3), сопряженной системы дифференциальных уравнений (7) и гамильтониана (6) останется в этом случае неизменным. Структура оптимального управления средней скоростью заходящих на посадку ВС также не претерпит изменений, поскольку члены гамильтониана, содержащие V_i , не зависят от U_i .

Запишем гамильтониан в виде

$$H = AU_1 + BU_2 + \varphi(V_1, V_2), \quad (15)$$

где $A = -\lambda_0 P_{1,1} - \lambda_0 P_{1,0} \psi_1 + \lambda_0 P_{1,0} \psi_2$, $B = -\lambda_0 P_{2,1} - \lambda_0 P_{2,0} \psi_3 + \lambda_0 P_{2,0} \psi_4$ – коэффициенты линейной части, $\varphi(V_1, V_2) = \frac{1}{t_{обс1} + \frac{L_1}{V_1}} [P_{1,1} \psi_1 - P_{1,1} \psi_2] + \frac{1}{t_{обс2} + \frac{L_2}{V_2}} [P_{2,1} \psi_3 - P_{2,1} \psi_4]$ – нелинейная часть. Не ограни-

чивая общности, предположим, что $A > B$.

Структура оптимального управления распределением потоков при этом примет вид

$$\begin{cases} U_1^* = 1 \\ U_2^* = 0 \end{cases}, \text{ если } \lambda_0 \leq \lambda_{огр1}, \quad (16)$$

$$\begin{cases} U_1^* = \frac{\lambda_{огр1}}{\lambda_0} \\ U_2^* = \min \left\{ (1 - U_1), \frac{\lambda_{огр2}}{\lambda_0} \right\} \end{cases}, \text{ если } \lambda_0 > \lambda_{огр1}. \quad (17)$$

Пример реализации структуры оптимального управления распределением потоков ВС для ограничений вида (14) при $\lambda_{огр1} = 20$ воздушных судов в час, $\lambda_{огр2} = 15$ ВС/ч, $A > B$ графически отражен на рис. 5.

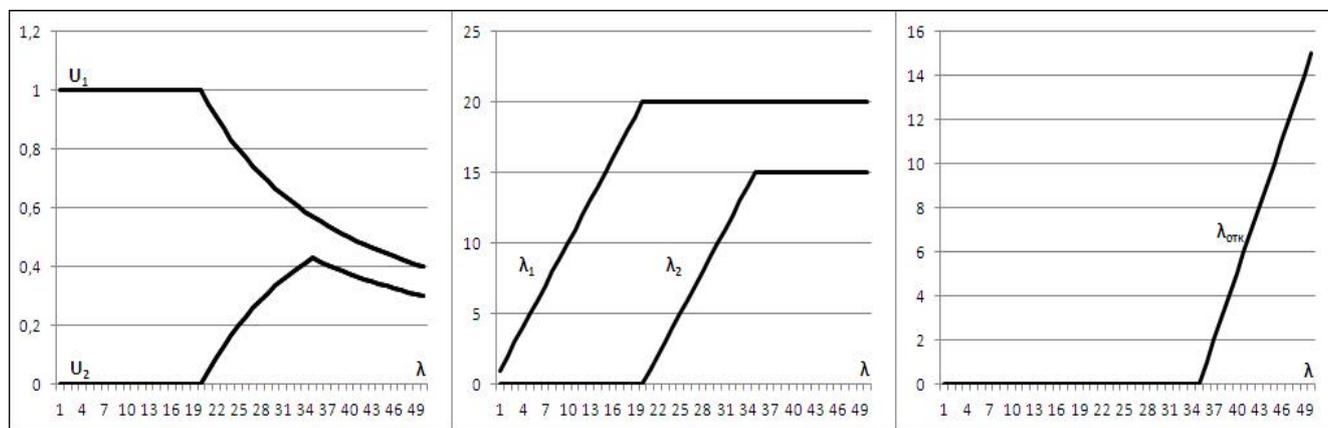


Рис. 5. Пример оптимального распределения потоков ВС
Fig. 5. Example of optimal air traffic distribution

Таким образом, оптимизация управления разделением потоков прибывающих для посадки ВС при ограничениях (14) достигается в некоторый момент времени путем выделения максимально возможной доли входящего потока на ту ВПП, повышение интенсивности движения по которой обеспечивает больший прирост критериальному функционалу. При этом оптимальные скорости движения V_i^* равны $V_{max i}$. В случае, когда интенсивность входящего потока λ_0 превосходит суммарную предельную пропускную способность двух ВПП $\lambda_{огр1} + \lambda_{огр2}$, сумма $U_1 + U_2$ принимает значение, меньшее 1. При этом возникает поток воздушных судов, получивших отказ в обслуживании на этапе распределения, интенсивность которого равна $\lambda_{отк} = \lambda_0(1 - U_1 - U_2)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В.Л., Филонов П.В., Чепурина А.А. Метод построения системы квантовых состояний в модели расчета пропускной способности аэропорта // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 184. С. 23–28.
2. Алёшин А.В. Имитационное моделирование процессов управления группами прилетающих и вылетающих воздушных судов при УВД в районе аэродрома // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 171. С. 129–136.
3. Людомир А.В., Орлов В.С. Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве // Прикладная информатика. 2014. № 5 (53). С. 89–97.
4. Кузнецов В.Л., Горчаков А.И. Комбинированная имитационно-аналитическая модель пропускной способности аэродромной воздушной зоны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 224 (2). С. 33–42.
5. Ивенина Е.М., Ивенин И.Б., Курилёнок А.С. Выделение типовых расчетных ситуаций для определения риска катастроф // Научный Вестник МГТУ ГА. 2009. № 145. С. 47–53.
6. Ивенин И.Б., Курилёнок А.С. Исследование влияния параметров воздушного движения на риск возникновения опасных ситуаций с использованием имитационной модели // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 157. С. 18–25.
7. Кузнецов В.Л., Соломенцев В.В. К задаче моделирования риска столкновений воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 120. С. 5–16.
8. Диль В.Ф., Сизых В.Н. Синтез оптимального управления воздушным судном на основе уравнений нелинейной динамики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 3. С. 139–148.
9. Кузнецов В.Л., Хаустов А.А. Моделирование динамики воздушного судна в спутном следе // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 195. С. 5–12.
10. Золотухин В.В. Моделирование вихревых следов в задачах управления воздушным движением // Программные продукты и системы. 2011. № 1. С. 126–129.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивенин Игорь Борисович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника подразделения по науке ГосНИИАС, ibi.new@mail.ru.

Курилёнок Антон Сергеевич, старший преподаватель кафедры прикладной математики МГТУ ГА, Anton.Kurilenok@ya.ru.

OPTIMAL TRAFFIC MANAGEMENT FOR AIRCRAFT APPROACHING THE AERODROME LANDING AREA

Igor B. Ivenin¹, Anton S. Kurilenok²

¹*State Research Institute of Aviation Systems (State Scientific Center of Russian Federation),
Moscow, Russia*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The research proposes a mathematical optimization approach of arriving aircraft traffic at the aerodrome zone. The airfield having two parallel runways, capable of operating independently of each other, is modeled. The incoming traffic of aircraft is described by a Poisson flow of random events. The arriving aircraft are distributed by the air traffic

controller between two runways. There is one approach flight path for each runway. Both approach paths have a common starting point. Each approach path has a different length. The approach trajectories do not overlap. For each of the two approach procedures, the air traffic controller sets the average speed of the aircraft. The given model of airfield and airfield zone is considered as the two-channel system of mass service with refusals in service. Each of the two servicing units includes an approach trajectory, a glide path and a runway. The servicing unit can be in one of two states – free and busy. The probabilities of the states of the servicing units are described by the Kolmogorov system of differential equations. The number of refusals in service on the simulated time interval is used as criterion for assessment of mass service system quality of functioning. This quality of functioning criterion is described by an integral functional. The functions describing the distribution of aircraft flows between the runways, as well as the functions describing the average speed of the aircraft, are control parameters. The optimization problem consists in finding such values of the control parameters for which the value of the criterion functional is minimal. To solve the formulated optimization problem, the L.S. Pontryagin maximum principle is applied. The form of the Hamiltonian function and the conjugate system of differential equations is given. The structure of optimal control has been studied for two different cases of restrictions on the control of the distribution of incoming aircraft traffic. The regularities of the control parameters influence on the value of the functional criterion are revealed.

Key words: optimal control, optimization, the L.S. Pontryagin maximum principle, air traffic, air traffic control, air traffic modeling.

REFERENCES

1. **Kuznetsov V.L., Filonov P.V., Chepurina A.A.** *Metod postroeniya sistemy kvantovykh sostoyaniy v modeli raschyota propusknoy sposobnosti aeroporta* [The quantum states system constructing method in airport throughput computation model]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2012, no. 184, pp. 23–28. (in Russian)
2. **Aleshin A.V.** *Imitatsionnoye modelirovaniye protsessov upravleniya gruppami priletaushih i vyletayushih vozdukhnykh sudov pri UVD v rayone aerodroma* [Air traffic control model for groups of landing and taking off aircrafts in a terminal control area]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2011, no. 171, pp. 129–136. (in Russian)
3. **Lyudomir A.V., Orlov V.S.** *Imitatsionnoye modelirovaniye dinamicheskoy vozdukhnoy obstanovki v upravlyayemom vozdukhnom prostranstve* [Simulation of dynamical environment in controlled airspace]. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics], 2014, no. 5 (53), pp. 89–97. (in Russian)
4. **Kuznetsov V.L., Gorchakov A.I.** *Kombonirovannaya imitatsionno-analiticheskaya model' propusknoy sposobnosti aerodromnoy vozdukhnoy zony* [Combined simulation-analytical model of aerodrome airspace capacity]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2016, no. 224 (2), pp. 33–42. (in Russian)
5. **Ivenin I.B., Kurilenok A.S.** *Vydeleniye tipovykh raschetnykh situatsiy dlya opredeleniya riska katoistrof* [Separation standard accounting situation for determination of the collision risk]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2009, no. 145, pp. 47–53. (in Russian)
6. **Ivenin I.B., Kurilenok A.S.** *Issledovanie vliyaniya parametrov vozdukhного dvizheniya na risk vozniknoveniya opasnykh situatsiy s ispol'zovaniem imitatsionnoy modeli* [Research of air traffic parameters influence on risk of dangerous situation occurrence with use of air traffic imitation model]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2010, no. 157, pp. 18–25. (in Russian)
7. **Kuznetsov V.L., Solometsev V.V.** *K zadache modelirovaniya riska stolknoveniya vozdukhnykh sudov* [On a problem of collision risk modeling of aircraft]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2007, no. 120, pp. 5–16. (in Russian)
8. **Dil V.F., Sizykh V.N.** *Sintez optimal'nogo upravleniya vozdukhnim sudnom na osnove upravleniy nelineynoy dinamiki* [Optimal aircraft control synthesis based on the equations of non-linear

dynamics]. Scientific Bulletin of the Moscow State Civil Aviation High Technologies, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 139–148. (in Russian)

9. Kuznetsov V.L., Khaustov A.A *Modelirovanie dinamiki vozduhnogo sudna v sputnom slede* [The self-consistent problem of aircraft dynamics in wake vortex]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2013, no. 195, pp. 5–12. (in Russian)

10. Zolotukhin V.V. *Modelirovanie vikhrevykh sledov v zadachah upravleniya vozdushnym dvizheniyem* [Modeling of vortex wake in the problems of air traffic management]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems International research and practice journal], 2011, no. 1, pp. 126–129. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor B. Ivenin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Science, State Research Institute of Aviation Systems (State Scientific Centre of Russian Federation), ibi.new@mail.ru.

Anton S. Kurilenok, Senior Lecturer of the Applied Mathematics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Anton.Kurilenok@ya.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

10.11.2017
14.03.2018

Received
Accepted for publication

10.11.2017
14.03.2018