

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОПУТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ВХОДЕ В ЭШЕЛОН ПОСАДКИ

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования является система управления попутным безопасным движением двух судов. Предметом исследования являются методы оптимального управления полетом. Целью настоящей работы является воспроизведение поведения человека путем количественной оценки текущего риска в движении и последующей перестройки системы управления на примере входа воздушного судна в эшелон на заданную линию пути.

Материалы и методы. Сформулирована задачи с учетом интегрального критерия безопасного движения и синтез законов оптимального управления попутным движением судов на основе динамического программирования.

Результаты. Результатом работы системы является соблюдение определенной безопасной дистанции между двумя судами, несмотря на внезапное замедление скорости впереди летящего судна. Получены результаты, подтверждающие возможность автоматического контроля безопасности в наземной диспетчерской службе.

Выводы. Найдено оптимальное управление безопасным попутным движением воздушных судов в виде алгоритма, имеющего в общем случае на своем входе координаты бокового движения воздушного судна x_1 и x_2 , координаты y_1 и z поступательного и бокового движения другого воздушного судна, а также скорости v_1 и v_2 поступательного и бокового движения двух судов. Синтезированная система управления может использоваться для автоматической подсказки летчику и диспетчерской наземной службы о возникновении сигнала тревоги при опасном сближении воздушных судов при входе в воздушный эшелон.

Ключевые слова: контроль безопасности, оптимальное управление, летательный аппарат, динамическое программирование, функция риска.

Tin Pkhon Chzho

THE AUTOMATED SYSTEM OF SECURITY CONTROL OF THE FOLLOWING MOTION OF AIRCRAFTS DURING LANDING

Abstract.

Background. The object of the research is the control system of safe following motion of two aircrafts. The subject of the research is the methods of optimal flight control. The article is aimed at reproduction of human actions through quantitative estimation of the current risk in movement and in subsequent rearrangement of the control system by the example of aircraft's entering the echelon on the back track.

Materials and methods. The author formulated a problem taking into account an integral criterion of motion safety and a synthesis of rules of optimal aircrafts' following movement control on the basis of dynamic programming.

Results. The result of the system work is maintaining a certain safe distance between two aircrafts despite the sudden deceleration of an aircraft flying in front. The author obtained the results confirming the possibility of automatic security control performed by the control tower service.

Conclusions. On the basis of the research carried out it is possible to make the following conclusions. 1. The author revealed optimal security control of the following motion of aircrafts in the form of an algorithm, having in general case on its input the coordinates of aircraft's lateral motion x_1 and x_2 , the coordinates y_1 and z of progressive and lateral motion of the second aircraft, and the velocities v_1 and v_2 of progressive and lateral motion of both aircrafts. 2. The synthesized system may be used for automatic prompting a pilot or control tower service on alert in case of dangerous closing in of two aircrafts while entering the echelon.

Key words: safety control, optimal control, aircraft, dynamic programming, function of risk.

Введение

При ручном управлении воздушным судном возникают реальные ощущения нарастания тревоги в случае недопустимого снижения безопасности движения, что вызывает последующую перестройку способа движения судов внутри воздушного эшелона при заходе на посадку. В связи с этим целью настоящей работы является моделирование поведения человека путем количественной оценки текущего риска в движении и последующей перестройки системы управления на примерах входа воздушного судна в эшелон на заданную линию пути и поперечного движения судов при их сближении.

В данной работе постановка каждой задачи формулируется с учетом интегрального критерия безопасного движения, и затем на основе динамического программирования синтезируются законы оптимального управления попутным и боковым движением судов. В завершение представлены результаты моделирования, подтвердившие возможность автоматического контроля безопасности в наземной диспетчерской службе.

1. Постановка задачи управления попутным движением

Схема движения двух воздушных судов в эшелоне, характеризующаяся координатами попутного движения x_1 и e_1 , определяющими главный показатель – дистанцию между судами $e_1 - x_1$, показана на рис. 1.

Уравнения движения объектов движения заданы в следующем виде:

$$\begin{cases} x_1' = d_1 x_2 + w_1, \\ x_2' = -a_1 x_2 + b_1 u_1; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_1' = d_2 e_2 + w_2, \\ e_2' = -a_2 e_2 + b_2 u_2. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим случай, когда одно из судов движется с непредсказуемой постоянной скоростью w_2 ; т.е. $d_1 = 1$, $d_2 = 0$, $e_2' = 0$, $w_1 = 0$. Тогда исходные уравнения (1) и (2) преобразуются к следующей системе:

$$\begin{cases} x_1' = x_2, \\ x_2' = -a_1 x_2 + b_1 u_1, \\ e_1' = w_2, \end{cases} \quad (3)$$

где x_1 – координата судна по поступательному движению; x_2 – поступательная скорость судна; e_1 – координата поступательного движения судна; w_2 – скорость движения судна.

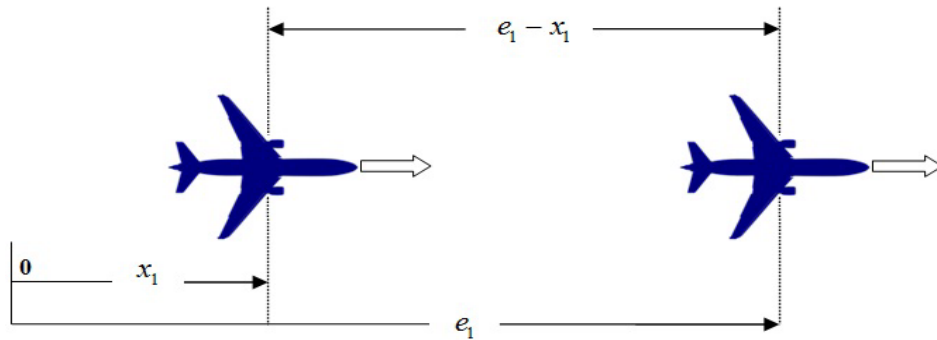


Рис. 1. Схема сближения двух воздушных судов при попутном движении

Потребуем, чтобы система (3) удовлетворяла заданному интегральному критерию качества

$$J = \int_0^{t_k} f_0(\bar{x}, u_1, t) dt. \quad (4)$$

Подынтегральное выражение функционала J равно

$$\begin{aligned} f_0 = & r_0 \frac{u_1^2}{2} + r_1 \frac{1}{2} [(e_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2 + \\ & + r_2 \frac{1}{2} (x_2 - w_2)^2 + M_2 (x_2 - w_2) - M_1 (e_1 - x_1), \end{aligned} \quad (5)$$

где r_0 – штраф за потраченную мощность при управлении рулем; r_1 – штраф за приближение к другому судну; r_2 – штраф за отклонение скоростей; D – безопасное расстояние между управляемым объектом и другим судном; $D + Nw_2$ – минимальная безопасная дистанция между двумя судами при заданном значении коэффициента N ; a_1, b_1 – коэффициенты объекта управления; M_1 – коэффициент, дополнительно учитывающий отклонение траектории движения двух судов; M_2 – коэффициент, дополнительно учитывающий отклонение их скоростей движения.

Требуется решить прямую задачу оптимизации, т.е. нужно найти функцию управления $u_1 = f(x_1, x_2)$.

2. Синтез оптимального управления попутным движением судов

Решим поставленную задачу с помощью динамического программирования [1, 2]. Функция Беллмана ε и ее производные записываются таким образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 e_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \gamma_3 \frac{e_1^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 e_1 + \psi_{23} x_2 e_1; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} &= \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial e_1} &= \beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Запишем уравнение Беллмана и представим в нем функцию ε степенным полиномом:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \min_u \left\{ f_0 + \sum \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} x_i' \right\}; \\ -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= r_0 \frac{u_2^2}{2} + r_1 \frac{[(e_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - w_2)^2}{2} - M_1(e_1 - x_1) + \\ &\quad + M_2(x_2 - w_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_1' + \\ &\quad + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) x_2' + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) e_1'; \\ -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= r_0 \frac{u_2^2}{2} + r_1 \frac{[(e_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - w_2)^2}{2} - M_1(e_1 - x_1) + \\ &\quad + M_2(x_2 - w_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_2 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) \times \\ &\quad \times (-a_2 x_2 + b_2 u_2) + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) w_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Оптимизируя функцию Беллмана по параметру u_2 , получаем

$$f(u_1) = r_0 \frac{u_1^2}{2} + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) b_1 u_1, \quad (8)$$

$$f'(u_1) = r_0 u_1 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) b_1 = 0;$$

$$\Rightarrow u_{1\text{опт}} = -\frac{b_1}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1). \quad (9)$$

Подставляя $u_{2\text{опт}}$ из (9) в выражение (8), получим

$$f(u_{1\text{опт}}) = r_0 \frac{b_1^2}{2r_0^2} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2 -$$

$$\begin{aligned}
 & -(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2 \frac{b_1^2}{r_0}; \\
 f(u_{\text{опт}}) = & -\frac{b_1^2}{2r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Подставив функцию $f(u_{\text{опт}})$ из (10) в уравнение Беллмана (7) и представив правую часть уравнения Беллмана степенным рядом, получаем

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \frac{r_1}{2} [(e_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2 + \frac{r_2}{2} (x_2 - w_2)^2 - M_1 (e_1 - x_1) + M_2 (x_2 - w_2) + \\
 & + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} e_1) x_2 - (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1) a_1 x_2 + \\
 & + (\beta_3 + \gamma_3 e_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) w_2 - \frac{b_1^2}{2r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} e_1)^2; \\
 -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & \left[r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 \right] x_1 + \left(-r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_1 + \right. \\
 & \left. + \psi_{23} w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 \right) x_2 + \left(-r_1 D - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23} \right) e_1 + \\
 & + \left(r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12}^2 \right) \frac{x_1^2}{2} + \left(r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2^2 \right) \frac{x_2^2}{2} + \left(r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23}^2 \right) \frac{e_1^2}{2} + \\
 & + \left(\gamma_1 - a_1 \psi_{12} - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_1 \psi_{12} \right) x_1 x_2 + \left(-r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23} \right) x_1 e_1 + \left(\psi_{13} - \psi_{23} a_1 - \right. \\
 & \left. - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2 \right) x_2 e_1 + \left[\frac{r_1}{2} (D + N w_2)^2 + \frac{r_2}{2} w_2^2 + M_2 w_2 + \beta_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2^2 \right]. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Приравнивая сомножители при одинаковых степенях и группируя их по степеням, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \dot{\beta}_1 x_1 = & \left[r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 \right] x_1; \\
 \dot{\beta}_2 x_2 = & \left(-r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_2 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 \right) x_2; \\
 \dot{\beta}_3 e_1 = & \left(-r_1 D - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23} \right) e_1;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\gamma}_1 \frac{x_1^2}{2} &= \left(r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12}^2 \right) \frac{x_1^2}{2}; \\
 \dot{\gamma}_2 \frac{x_2^2}{2} &= \left(r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2^2 \right) \frac{x_2^2}{2}; \\
 \dot{\gamma}_3 \frac{e_1^2}{2} &= \left(r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23}^2 \right) \frac{e_1^2}{2}; \\
 \dot{\psi}_{12} x_1 x_2 &= \left(\gamma_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \psi_{12} + \gamma_1 d - a_1 \psi_{12} \right) x_1 x_2; \\
 \dot{\psi}_{13} x_1 e_1 &= \left(-r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23} \right) x_1 e_1; \\
 \dot{\psi}_{23} x_2 e_1 &= \left(\psi_{13} - \psi_{23} a_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2 \right) x_2 e_1. \tag{12}
 \end{aligned}$$

Заменяя дифференциальные уравнения алгебраическими при $-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$, получим

$$\begin{aligned}
 r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 &= 0; \\
 -r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_1 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2 &= 0; \\
 -r_1 D - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23} &= 0; \\
 \left(r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12}^2 \right) &= 0; \\
 r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2^2 &= 0; \\
 r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23}^2 &= 0; \\
 \gamma_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \psi_{12} + \gamma_1 d - a_1 \psi_{12} &= 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \Psi_{12} \Psi_{23} &= 0; \\
 \Psi_{13} - \Psi_{23} a_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \Psi_{23} \gamma_2 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

После несложных преобразований, полагая, что $-\frac{b_2^2}{r_0} \gamma_2^2 \approx 0$, окончательно получим нижеследующее решение:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \beta_1 &= r_2 w_2 + \left(a_1 + \frac{b_1^2}{r_0} \right) \beta_2 - M_2 + w_2 \Psi_{23}, \\
 \beta_2 &= \frac{r_0 (r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \Psi_{13} w_2)}{b_1^2 \Psi_{12}}, \\
 \gamma_1 &= \Psi_{12} \left(a_1 + \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \right), \\
 \gamma_2 &= \frac{r_2 + 2 \Psi_{12}}{2 a_2}, \\
 \gamma_3 &= \frac{\frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \Psi_{23} + r_1 D + r_1 N w_2 + M_1}{w_2}, \\
 \Psi_{12} &= \sqrt{r_1 r_0} / b_1, \\
 \Psi_{13} &= \Psi_{23} \left(a_1 + \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2 \right), \\
 \Psi_{23} &= -\Psi_{12}.
 \end{aligned} \right.
 \tag{14}$$

Подставим четыре составляющих $\beta_2, \gamma_2, \Psi_{12}, \Psi_{23}$ решения (14) в выражение

$$u_{1\text{опт}} = -\frac{b_1}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \Psi_{12} x_1 + \Psi_{23} e_1)$$

и получим

$$\begin{aligned}
 u_1 &= -\frac{b_1}{r_0} \left\{ \frac{r_0 (r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \Psi_{13} w_2)}{b_1^2 \Psi_{12}} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{r_2 + 2 \Psi_{12}}{2 a_2} x_2 + \frac{\sqrt{r_1 r_0}}{b_1} x_1 - \Psi_{12} e_1 \right\}.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Подставив полученную функцию u_1 в выражение (1), получим окончательный результат синтеза:

$$\begin{cases} x_1' = x_2, \\ x_2' = -a_1 x_2 + b_2 u_2 = \\ e_1' = w_2; \end{cases} = \begin{cases} x_1' = x_2, \\ x_2' = -a_1 x_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \left\{ \frac{r_0 (r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \Psi_{13} w_2)}{b_1^2 \Psi_{12}} + \right. \\ \left. + \frac{r_2 + 2\Psi_{12}}{2a_1} x_2 + \frac{\sqrt{r_1 r_0}}{b_1} x_1 - \Psi_{12} e_1 \right\}, \\ e_1' = w_2; \end{cases} = \begin{cases} x_1' = x_2, \\ x_2' = - \left(a_1 + \frac{b_2^2 r_2 + 2\Psi_{12}}{r_0} \right) x_2 - \frac{b_2^2 \sqrt{r_1 r_0}}{r_0 b_1} x_1 - \\ - \frac{b_1^2}{r_0} \Psi_{12} e_1 - \frac{b_1^2 r_0 (r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \Psi_{13} w_2)}{b_1^2 \Psi_{12}}, \\ e_1' = w_2. \end{cases} \quad (16)$$

Моделирование системы управления попутным движением проводилось при условиях, описанных в [3]:

$$r_0 = 1, \quad r_1 = 200, \quad r_2 = 16, \quad d_1 = 1, \quad D = 2000m, \quad a_2 = 0,5, \quad b_2 = 0,5.$$

Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов показаны на рис. 2.

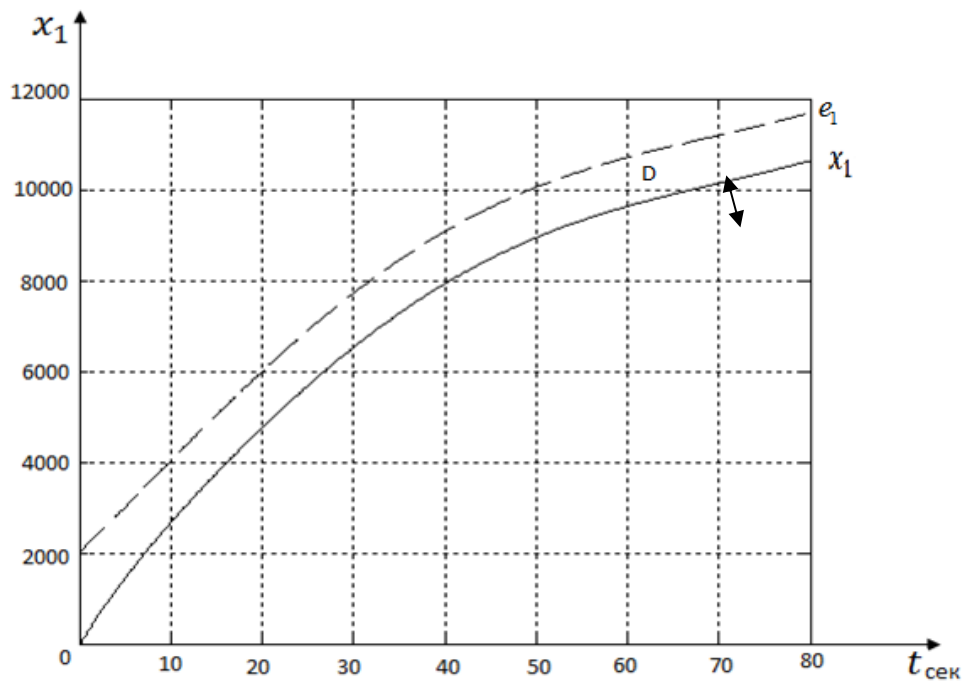


Рис. 2. Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов

Из рис. 2 видно, что между судами существует определенная безопасная дистанция, несмотря на внезапное замедление скорости впереди летящего судна.

Заключение

Сформулирована и решена задача оптимального управления безопасным попутным движением воздушных судов. Предложенное оптимальное управление может быть реализовано в виде системы автоматического управления, что особенно важно для беспилотной авиации. Синтезированная оптимальная система управления может использоваться в составе системы принятия решений при пилотировании судна и организации диспетчерской наземной службы в случае опасного сближении воздушных судов при входе в воздушный эшелон.

Список литературы

1. **Беллман, Р.** Динамическое программирование / Р. Беллман. – М. : ИИЛ, 1961. – 400 с.
2. **Лебедев, Г. Н.** Теория оптимальных систем / Г. Н. Лебедев, Ю. С. Гришанин, А. В. Липатов, Г. А. Степаньянц. – М. : МАИ, 1999. – 264 с.
3. **Лебедев, Г. Н.** Решение задачи динамического программирования при безопасном попутном движении воздушных судов / Г. Н. Лебедев, Тин Пхон Чжо, Чан Ван Туен // Труды МАИ. – 2012. – № 54. – С. 51–60.

References

1. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye* [Dynamic programming]. Moscow: IIL, 1961, 400 p.
2. Lebedev G. N., Grishanin Yu. S., Lipatov A. V., Stepan'yants G. A. *Teoriya optimal'nykh system* [Theory of optimal systems]. Moscow: MAI, 1999, 264 p.
3. Lebedev G. N., Tin Pkhon Chzho, Chan Van Tuen. *Trudy MAI* [Proceedings of the MAI]. 2012, no. 54, pp. 51–60.

Тин Пхон Чжо

кандидат технических наук, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)

E-mail: thehtweaung@gmail.com

Tin Phone Chzho

Candidate of engineering sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

УДК 629.7.017.1+519.852

Тин Пхон Чжо

Автоматизированная система управления и контроля безопасности попутного движения группы воздушных судов при входе в эшелон посадки / Тин Пхон Чжо // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 72–80.