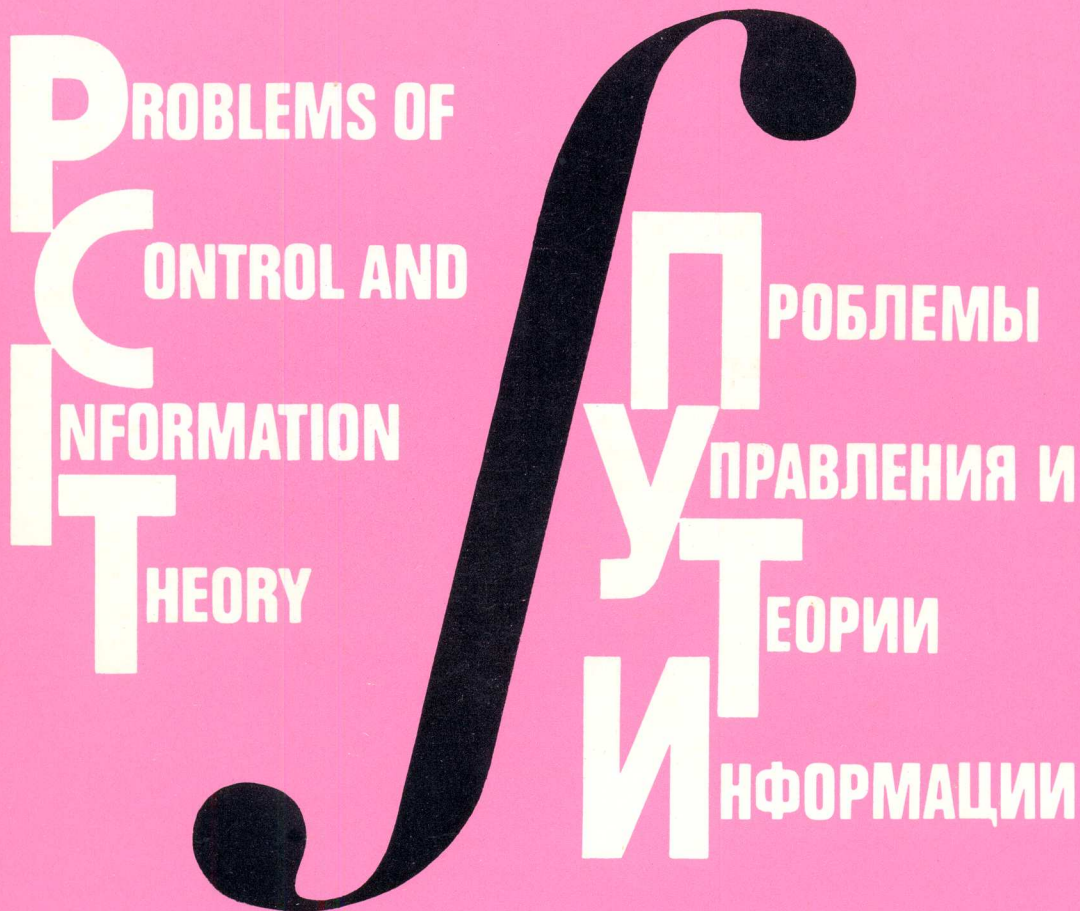


VOL. 18 • NUMBER 4
TOM HOMEP

ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR
HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
CZECHOSLOVAK ACADEMY OF SCIENCES



АКАДЕМИЯ НАУК С С С Р **1989**
ВЕНГЕРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ЧЕХОСЛОВАЦКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST
DISTRIBUTED OUTSIDE THE COMECON-COUNTRIES
BY PERGAMON PRESS, OXFORD

РУССКИЙ ПЕРЕВОД

Проблемы управления и теории информации, том 18, номер 4 (1989)

УПРАВЛЕНИЕ САМОЛЕТОМ НА ПОСАДКЕ ПРИ СДВИГЕ ВЕТРА

Н. Д. Боткин, В. М. Кейн, В. С. Пацко, В. Л. Турова

(Свердловск, Ленинград)

Традиционные способы управления самолетом на посадке плохо работают в условиях резкого изменения скорости ветра. В связи с этим в последнее время исследуются [1–6] новые способы управления на посадке. Статья посвящена минимаксному способу, основанному на методах теории дифференциальных игр [7, 8]. Применение методов теории дифференциальных игр к задаче посадки изучалось ранее в работах [1–3, 9–13].

1. Введение

В настоящее время имеется значительное число работ [3–6, 9, 14, 15], в которых анализируется поведение самолета на взлете и посадке при резком изменении скорости ветра (сдвиг ветра). Изучаются физические условия возникновения сдвига ветра, математические модели этого явления, способы управления самолетом.

В статье исследуется процесс посадки среднего транспортного самолета в условиях ветрового возмущения. Рассматривается движение на предпоследней прямой до момента пролета торца взлетно-посадочной полосы (ВПП). Относительно ветра предполагаются известными ориентировочно лишь пределы возможных отклонений его скорости от некоторого номинального значения и само это значение. Какие-либо сведения о пространственном расположении области сдвига ветра, равно как и информация о распределении скорости ветра в ней, считаются отсутствующими. Таким образом, естественно возникает задача о нахождении минимаксного способа управления самолетом по принципу обратной связи, рассчитанного на любое изменение скорости ветра в оговоренных пределах.

В работе минимаксное решение получено в рамках вспомогательных линейных задач на основе методов теории антагонистических дифференциальных игр [7, 8]. Затем оно используется при моделировании в полной нелинейной

системе. Результаты моделирования относятся к случаю, когда сдвиг ветра обусловлен прохождением самолета через зону микровзрыва. Микровзрыв образуется за счет нисходящего потока воздуха, который ударяется о поверхность земли и растекается затем с образованием вихря. Математическая модель микровзрыва взята из работы [14].

2. Нелинейная система движения самолета на посадке

Движение самолета на посадке описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений 12-го порядка, где вектор состояния включает три координаты x , y , z центра масс в системе, связанной с поверхностью ВПП (фиг. 1), углы тангажа ϑ , рыскания ψ и крена γ , а также соответствующие линейные и угловые скорости. Конкретный вид уравнений приводится, например, в [16, 17].

Управляющими воздействиями являются отклонения рулей высоты δ_v , направления δ_n , элеронов δ_e и изменение тяги двигателей P . К уравнениям самолета добавляются уравнения динамики рулевых приводов и двигателей. Указанные выше величины входят теперь в расширенный вектор состояния объекта, а управляющими становятся задающие (командные) δ_{vz} , δ_{nz} , δ_{ez} , δ_{pz} . Каждое из них ограничено снизу и сверху.

Полученную в итоге полную систему дифференциальных уравнений в векторной форме запишем в виде

$$\dot{\xi} = f(\xi, \delta_s, W). \quad (2.1)$$

Здесь $\delta_s = (\delta_{vz}, \delta_{pz}, \delta_{nz}, \delta_{ez})^T$ — векторный параметр управления, $W = (W_x, W_y, W_z)^T$ — векторный параметр помехи, состоящий из компонент скорости ветра по осям x , y , z .

3. Минимаксный способ управления

Номинальное движение самолета на этапе посадки до момента пролета торца ВПП представляет собой равномерное движение (без вращения) по прямолинейной глиссаде снижения.

Задача управления состоит в том, чтобы реальное движение, проходящее в условиях ветрового возмущения, не слишком сильно отличалось от номинального. Желательно также, чтобы закон управления не требовал для своей реализации какой-либо точной и детализированной информации о ветровой помехе.

Мы считаем, что приближенно могут быть известны лишь «грубые» характеристики ветрового возмущения, а именно, пределы отклонений компонент W_x , W_y , W_z скорости ветра от некоторых номинальных значений W_{x0} , W_{y0} , W_{z0} , которые предполагаем заданными. Обратимся к минимаксной постановке задачи управления. Поскольку движение самолета описывается дифференциальными уравнениями, мы приходим к дифференциальной игре.

В настоящее время разработаны эффективные программы [9, 12, 18–20], позволяющие находить на ЭВМ оптимальные законы управления (стратегии) для линейных дифференциальных игр с фиксированным моментом окончания и выпуклой функцией платы, зависящей от двух координат фазового вектора. Система (2.1) не является линейной. Однако мы можем линеаризовать ее относительно номинального движения, поставить вспомогательные линейные задачи и использовать затем их решение в исходной нелинейной системе.

Итак, задав номинальные составляющие W_{x0} , W_{y0} , W_{z0} скорости ветра, угол наклона глиссады и номинал модуля воздушной скорости, вычисляем соответствующие номинальному движению значения фазовых переменных системы (2.1). Линеаризуя систему (2.1) относительно номинального движения, приходим к линейной управляемой системе, распадающейся на две подсистемы вертикального (продольного) и бокового движений [16]. В подсистеме вертикального движения фазовыми переменными являются отклонения Δx , Δy и величины, их определяющие. В подсистему бокового движения входит отклонение Δz и величины, его определяющие.

Для каждой из подсистем поставим вспомогательную дифференциальную игру с фиксированным моментом окончания T , геометрическими ограничениями на управляющие воздействия и воздействия помехи, выпуклой функцией платы, зависящей от двух координат фазового вектора в момент T . В вертикальном движении за такие координаты возьмем Δy и $\Delta \dot{y}$, в боковом — Δz и $\Delta \dot{z}$. Первый игрок, распоряжающийся управляющими воздействиями, минимизирует значения функции платы. Второй, в ведении которого воздействия помехи, максимизирует функцию платы. В рамках вспомогательных задач можно не придавать моменту T какого-либо физического смысла.

Воздействия δ_{pz} и δ_{nz} в системе (2.1) на этапе посадки имеют специфическое назначение: стабилизация воздушной скорости и поддержание вблизи нуля величины угла скольжения. Не совсем естественно находить способы формирования δ_{pz} и δ_{nz} из решения описанных вспомогательных дифференциальных игр. Поэтому условимся при формулировке вспомогательных задач считать тягу постоянной и совпадающей с номинальной (т.е. $\Delta \delta_{pz} \equiv 0$), а изменение $\Delta \delta_{nz}$ подчиним линейному дифференциальному уравнению, описывающему прин-

ятый в настоящее время закон управления по рулю направления, опустив при этом ограничение на $\Delta\delta_{nz}$. Таким образом, в подсистеме вертикального движения остается одно управляющее воздействие $\Delta\delta_{pz}$, в подсистеме бокового движения — воздействие $\Delta\delta_{pz}$.

Чтобы учесть свойства, характеризующие инерционность изменения скорости ветра вдоль движения, подчиним переменные ΔW_x , ΔW_y , ΔW_z дополнительным линейным дифференциальным уравнениям, например,

$$\begin{aligned}\Delta\dot{W}_x &= k_1(\Delta F_x - \Delta W_x) \\ \Delta\dot{F}_x &= k_2(w_x - \Delta F_x).\end{aligned}\quad (3.1)$$

Здесь новой независимой переменной является w_x , константы k_1 и k_2 регулируют инерционность изменения ΔW_x . Аналогичные уравнения введем для ΔW_y и ΔW_z . Переменные w_x , w_y , w_z трактуем как воздействия помехи. Уравнения, определяющие ΔW_x и ΔW_y , отнесем к подсистеме вертикального движения, уравнения для ΔW_z — к подсистеме бокового движения.

Решая вспомогательные задачи на ЭВМ, находим оптимальные для них законы управления по $\Delta\delta_{pz}$ и $\Delta\delta_{pz}$. Эти законы реализуются при помощи наборов K_{pz} и K_{pz} линий переключения [9, 13, 18, 19]. Каждый набор задан на сетке моментов τ_i обратного времени, отсчитываемого от момента T .

Наборы K_{pz} , K_{pz} линий переключения для $\Delta\delta_{pz}$, $\Delta\delta_{pz}$ и определяют искомым способ управления по δ_{pz} , δ_{pz} в исходной системе (2.1). При работе с ним делаем текущий прогноз времени, оставшегося до момента пролета торца ВПП. Соответственно прогнозу используем вполне определенные линии переключения для выбора δ_{pz} и δ_{pz} . При моделировании движений системы (2.1) воздействия δ_{pz} и δ_{pz} условимся вырабатывать на основе принятых в настоящее время законов.

Таким образом, говоря о минимаксном способе управления нелинейной системой (2.1), имеем в виду способ формирования управляющих воздействий δ_{pz} и δ_{pz} , полученный из решения вспомогательных линейных дифференциальных игр. Воздействия δ_{pz} и δ_{pz} формируются традиционными методами.

4. Вспомогательные линейные дифференциальные игры

Линейная система дифференциальных уравнений вертикального движения имеет вид

$$\dot{x} = A_*x + B_*u + C_*v, \quad x \in R^{11}, \quad (4.1)$$

$$A_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.050 & 0 & -0.097 & -2.642 & 0 & 0.063 & 0.050 & 0 & 0.097 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.241 & 0 & -0.639 & 45.278 & 0 & 1.448 & -0.241 & 0 & 0.638 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.007 & -0.501 & -0.526 & -0.383 & 0 & 0 & -0.007 & 0 \\ & & & & & & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & -0.5 & 0.50 & 0 & 0 \\ & & & 0 & & & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix}$$

$$B_* = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 0)^T, \quad C_* = \begin{pmatrix} 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0 \\ 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3 \end{pmatrix}^T$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_{11})^T, \quad u = \Delta\delta_{вз}, \quad v = (w_x, w_y)^T.$$

Здесь $x_1 = \Delta x$, $x_3 = \Delta y$ — отклонения от номинальных значений по осям x , y ; $x_5 = \Delta\theta$ — отклонение угла тангажа. Координата x_7 имеет смысл отклонения руля высоты от балансировочного положения. При помощи переменных x_8 , x_9 описывается изменение величины ΔW_x . Соответствующие уравнения совпадают с (3.1), при этом $x_8 = \Delta W_x$. Переменные x_{10} , x_{11} служат для описания величины ΔW_y ($x_{10} = \Delta W_y$). Управляющее воздействие первого игрока — заданное отклонение $\Delta\delta_{вз}$ руля высоты. Параметры w_x , w_y служат для формирования ветровой помехи и принадлежат второму игроку. Ограничения:

$$|\Delta\delta_{вз}| \leq 10^\circ \pi/180, \quad |w_x| \leq 10 \text{ м/с}, \quad |w_y| \leq 5 \text{ м/с}.$$

Введем функцию φ_* , зависящую от координат $x_3 = \Delta y$ и $x_4 = \Delta y$. Для этого рассмотрим на плоскости x_3 , x_4 симметричный относительно нуля выпуклый шестиугольник с вершинами $(-3, 0)$, $(-3, 1)$, $(0, 1)$, $(3, 0)$, $(3, -1)$, $(0, -1)$. Положим

$$\varphi_*(x_3, x_4) = \min \{c \geq 0 : (x_3, x_4)^T \in cM_*\}.$$

Рассмотрим антагонистическую дифференциальную игру с динамикой (4.1), фиксированным моментом окончания T и платой φ_* . Первый игрок минимизирует значения платы φ_* в момент T , второй — максимизирует. Множество M_* можно трактовать как допуск на отклонения $x_3 = \Delta y$, $x_4 = \Delta \dot{y}$ в момент T . Функция φ_* показывает отклонение от допуска. Оптимальная стратегия первого игрока в игре (4.1) будет использована для задания δ_{α_3} в системе (2.1).

Линейная система бокового движения имеет вид

$$\dot{x} = A^*x + B^*u + C^*v, \quad x \in R^{11}, \quad (4.2)$$

$$A^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.077 & -5.555 & 0 & 9.272 & 0 & -1.485 & 0 & 0.077 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.013 & -0.933 & -0.259 & -0.088 & -0.030 & -0.246 & -0.046 & 0.012 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.051 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.033 & -2.386 & -0.953 & -0.226 & -1.459 & -0.233 & -0.689 & 0.033 & 0 & 0 \\ & & & & & & -4 & 0 & 0 & 0 & 4 \\ & & & & & & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & & & 0 & 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & -0.058 & -4.202 & -0.365 & -0.397 & -0.136 & -1.105 & -0.207 & 0.058 & 0 & -0.4 \end{pmatrix}$$

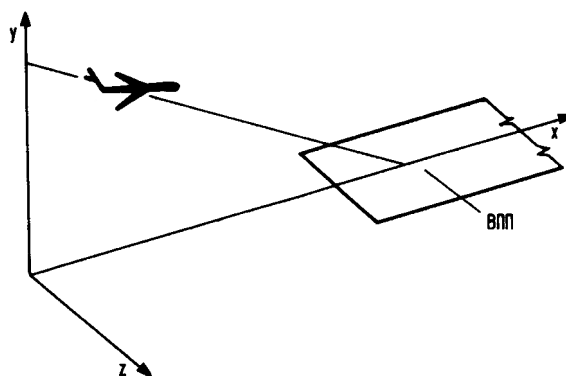
$$B^* = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0)^T, \quad C^* = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0)^T,$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_{11})^T, \quad u = \Delta \delta_{\alpha_3}, \quad v = w_z.$$

Здесь $x_1 = \Delta z$ — отклонение от оси z , $x_3 = \Delta \psi$ и $x_5 = \Delta \gamma$ — отклонения углов рыскания и крена. Координаты x_7, x_8 имеют смысл отклонения руля направления и элеронов ($\Delta \delta_{\alpha_1}, \Delta \delta_{\alpha_2}$), $x_{11} = \Delta \delta_{\alpha_3}$. При помощи переменных x_9, x_{10} описывается изменение величины ΔW_z , при этом $x_9 = \Delta W_z$. Управляющее воздействие первого игрока — заданное отклонение $\Delta \delta_{\alpha_3}$ элеронов. Параметр w_z служит для формирования помехи и принадлежит второму игроку. Ограничения:

$$|\Delta \delta_{\alpha_3}| \leq 10^\circ \frac{\pi}{180}, \quad |w_z| \leq 10 \text{ м/с}.$$

Введем функцию φ^* , зависящую от координат $x_1 = \Delta z$ и $x_2 = \Delta \dot{z}$. Для этого рассмотрим на плоскости x_1, x_2 симметричный относительно нуля выпуклый



Фиг. 1. Система координат

шестиугольник M^* с вершинами $(-6, 0)$, $(-6, 1.5)$, $(0, 1.5)$, $(6, 0)$, $(6, -1.5)$, $(0, -1.5)$. Положим

$$\varphi^*(x_1, x_2) = \min \{c \geq 0 : (x_1, x_2)^T \in cM^*\}.$$

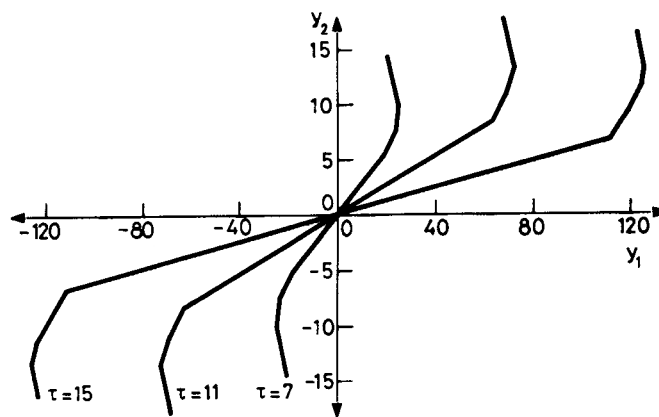
Рассмотрим антагонистическую дифференциальную игру с динамикой (4.2), фиксированным моментом окончания T и платой φ^* . Первый игрок минимизирует значения платы φ^* в момент T , второй максимизирует. Множество M^* — допуск на отклонения $x_1 = \Delta z$, $x_2 = \Delta z$ в момент T . Функция φ^* показывает отклонение от допуска. Оптимальная стратегия первого игрока в игре (4.2) будет использована для задания δ_{33} в системе (2.1).

В системах (4.1), (4.2) линейные величины измеряются в метрах, углы — в радианах, время — в секундах. Для численного задания систем (4.1), (4.2) были взяты следующие исходные данные: угол наклона глиссады $\Theta = -2.66^\circ$, номинал модуля воздушной скорости $\bar{V}_0 = 72.2$ м/с, номиналы составляющих скорости ветра $W_{x0} = -5$ м/с, $W_{y0} = W_{z0} = 0$.

5. Оптимальная стратегия первого игрока в линейной дифференциальной игре

Специфические особенности дифференциальных игр (4.1), (4.2) состоят в следующем. Каждая из них есть игра с фиксированным моментом окончания и выпуклой функцией платы, зависящей от двух координат фазового вектора. Кроме того, управляющее воздействие первого игрока является скалярным. Эти особенности позволяют сравнительно просто найти оптимальную стратегию первого игрока. Она задается при помощи поверхности переключения в пространстве t, y_1, y_2 эквивалентной [7, 8] игры второго игрока. Связь между

векторами $y = (y_1, y_2)^T$ и x описывается формулой $y(t) = X_*(T, t)x(t)$ ($y(t) = X^*(T, t)x(t)$), где $X_*(T, t)$ ($X^*(T, t)$) — матрица из 3 и 4-ой (1 и 2-ой) строк фундаментальной матрицы Коши однородной части системы (4.1), ((4.2)). По одну сторону от поверхности переключения оптимальное управляющее воздействие принимает экстремальное значение одного знака, по другую сторону — противоположного. Математическое обоснование оптимальности способа управления при помощи поверхности переключения и анализ его устойчивости приведены в работах [18, 19]. Соответствующие численные процедуры разъясняются в [9].



Фиг. 2. Линии переключения

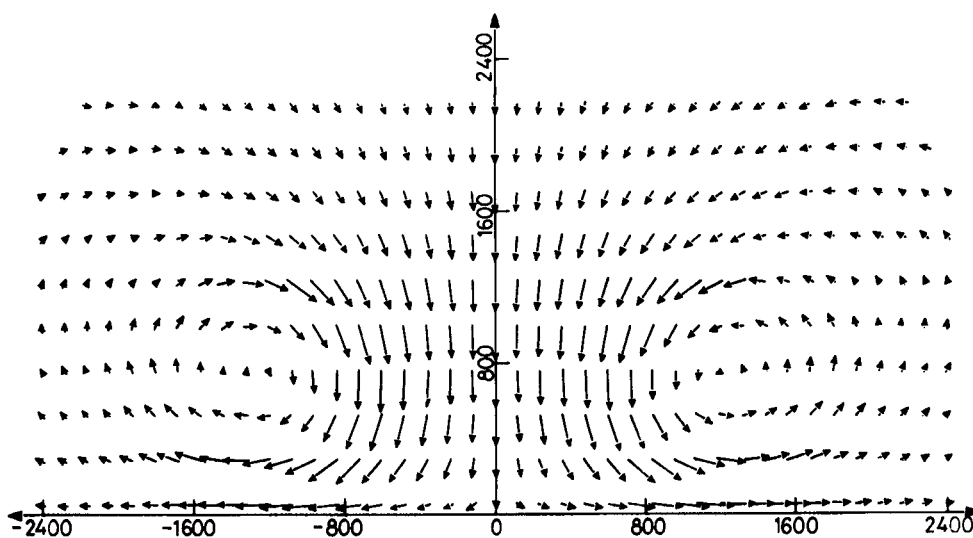
При построении на ЭВМ поверхность переключения реализуется в виде набора сечений на заданной сетке моментов времени. Эти сечения называем линиями переключения. На фиг. 2 показаны линии переключения $\Pi_*(\tau)$ в игре (4.1), просчитанные для моментов обратного времени $\tau = 7, 11, 15$. Пусть в момент t_i состояние системы (4.1) есть $x(t_i)$. Если точка $y(t_i) = X_*(T, t_i)x(t_i)$ расположена относительно линии переключения $\Pi_*(\tau_i)$, соответствующей моменту $\tau_i = T - t_i$, в направлении вектора $D_*(t_i) = X_*(T, t_i)B_*$, то на очередном шаге дискретной схемы управления полагаем $\Delta\delta_{вз} = -10$. При противоположном расположении точки $y(t_i)$ относительно линии $\Pi_*(\tau_i)$ примем $\Delta\delta_{вз} = +10$. Аналогично при помощи линий переключения $\Pi^*(\tau)$ и вектора $D^*(t) = X^*(T, t)B^*$ производится выбор оптимального управляющего воздействия $\Delta\delta_{вз}$ в игре (4.2).

6. Модель микровзрыва

При моделировании движений системы (2.1) будем считать, что ветровое возмущение вызвано попаданием самолета в зону микровзрыва. В настоящее время имеется обширная литература, посвященная микровзрыву. Используемая нами модель взята из [14]. Кратко опишем ее.

Микровзрыв идеализируется в виде трехмерного осесимметричного вихревого поля, в котором выделяется тороидальная область («ядро»), где скорость ветра, начиная от нулевой в центре, линейно увеличивается по радиусу до границы ядра. Вне ядра вихревое поле задается функцией потока. Дифференцирование функции потока дает радиальную и вертикальную составляющие скорости ветра. Первая из них раскладывается затем на две компоненты: параллельно и перпендикулярно оси ВПП. Микровзрыв задается тремя параметрами: V — скорость ветра в центральной части, H — высота центральной части, R — радиус вихря. Радиус ядра вихря полагается равным $0.8 R$. Для конкретизации расположения микровзрыва относительно глиссады снижения следует выбрать координаты его центра в горизонтальной плоскости.

Приводимые ниже результаты моделирования относятся к микровзрыву с параметрами $V = 6$ м/с, $H = 700$ м, $R = 1200$ м. Просчитанное на ЭВМ поле скорости ветра в вертикальной плоскости, проходящей через центр микровзрыва, показано на фиг. 3.



Фиг. 3. Поле скорости ветра в вертикальном сечении микровзрыва

7. Результаты моделирования

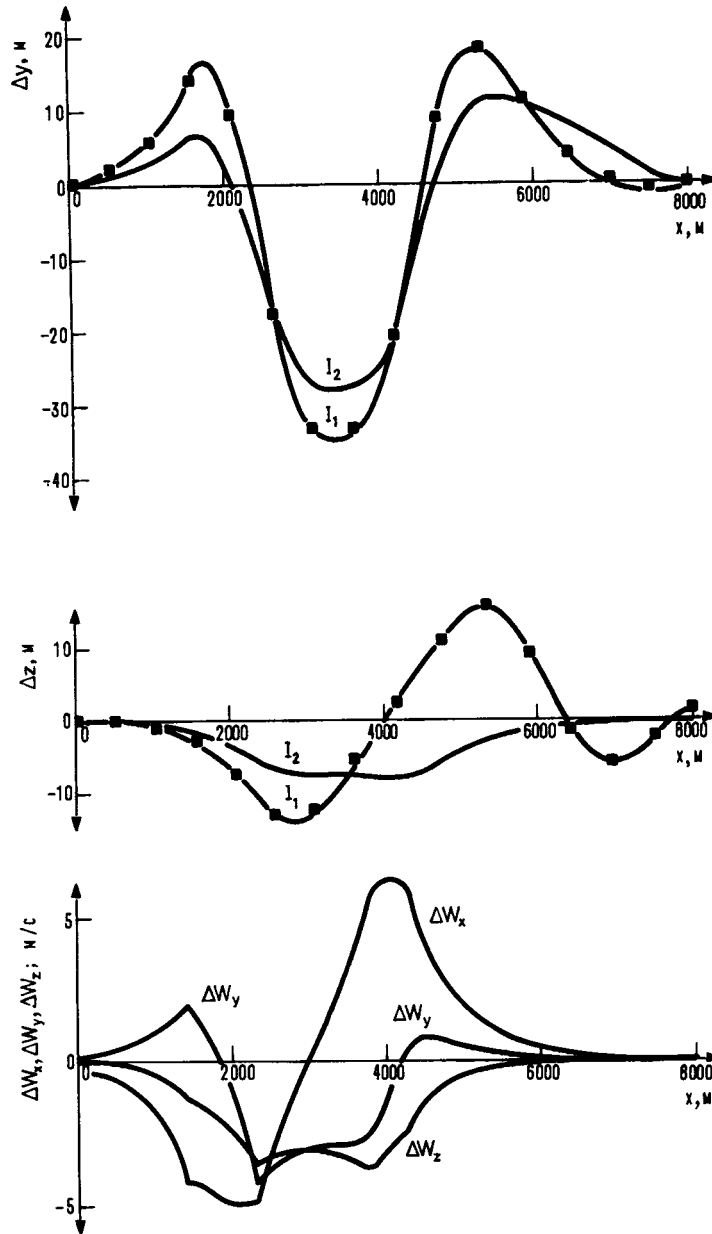
Пусть в момент t_* начальное положение системы (2.1) по оси x находится на расстоянии 8000 м от торца ВПП и значения всех фазовых координат соответствуют номинальному движению по глиссаде.

Рассмотрим два способа управления. Способ I_1 использует алгоритмы формирования $\delta_{вз}$, $\delta_{рз}$, $\delta_{вз}$ и $\delta_{зз}$, принятые в настоящее время. Второй способ — минимаксный. Обозначим его I_2 . В способе I_2 воздействия $\delta_{вз}$ и $\delta_{зз}$ формируются при помощи линий переключения, взятых из решения вспомогательных дифференциальных игр (4.1) и (4.2), воздействия $\delta_{рз}$, $\delta_{вз}$ — при помощи принятых в настоящее время алгоритмов. Во вспомогательных задачах положим $T=15$ с.

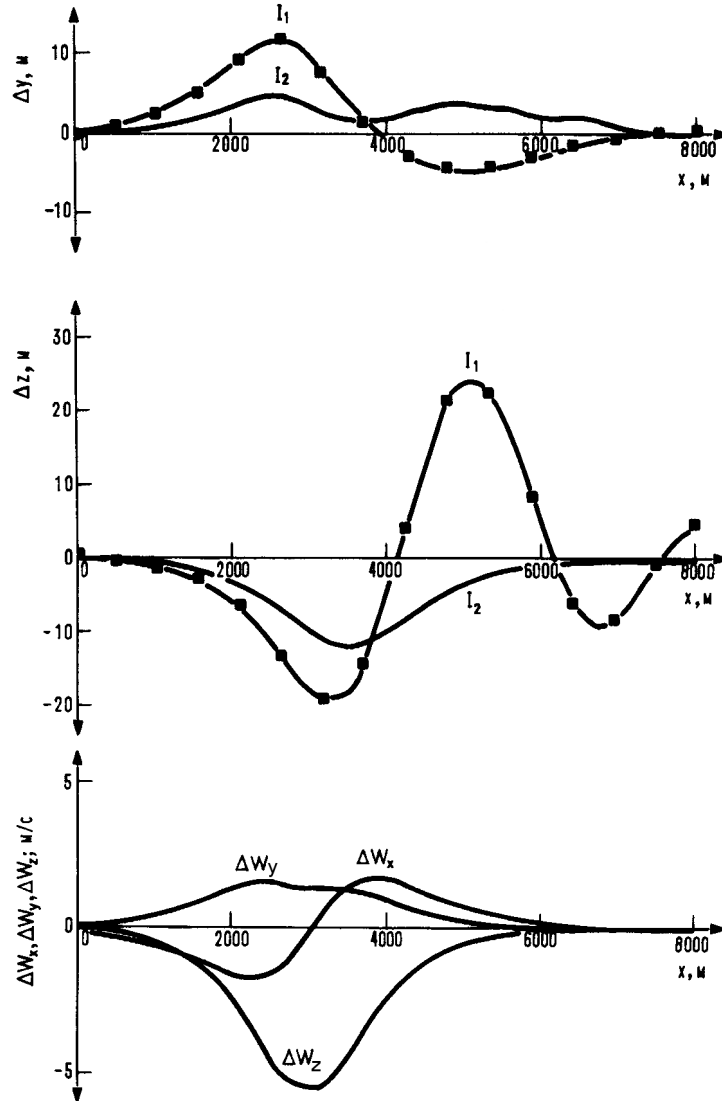
Обозначим через E сетку моментов обратного времени τ_i из промежутка $[0, T]=[0, 15]$, на которой построены линии переключения. Линии переключения применяем в способе I_2 следующим образом. Пусть $d(t)$ — расстояние в момент $t \geq t_*$ по оси x до торца ВПП, V_{x0} — скорость номинального движения по оси x . Тогда $s(t) = d(t)/V_{x0}$ — прогноз времени до пролета торца ВПП. Пока $s(t) \geq T=15$ с, для выбора $\delta_{вз}$ (соответственно $\delta_{зз}$) используем одну и ту же линию переключения, отвечающую $\tau = T$. Если $s(t) < T$, то берем линию, соответствующую моменту τ_i из E , ближайшему к $s(t)$. Таким образом, мы управляем сравнительно «грубо» по $\delta_{вз}$ и $\delta_{зз}$, пока расстояние $d(t)$ до торца ВПП больше $V_{x0}T \approx 1000$ м и более качественно при $d(t) < V_{x0}T$. Компоненты W_x , W_y , W_z скорости ветра перед подачей в систему (2.1) просчитываются в виде $W_x = \Delta W_x + W_{x0}$, $W_y = \Delta W_y + W_{y0}$, $W_z = \Delta W_z + W_{z0}$, где ΔW_x , ΔW_y , ΔW_z берутся с модели микровзрыва, $W_{x0} = -5$ м/с, $W_{y0} = W_{z0} = 0$. Рассмотрим два варианта расположения центра микровзрыва в горизонтальной плоскости: 1) смещение Dx по оси x от начального положения самолета равно 3000 м (5000 м от торца ВПП), смещение Dz по оси z перпендикулярно оси ВПП составляет 500 м, 2) $Dx = 3000$ м, $Dz = 1500$ м.

На фиг. 4, 5 приведены графики изменения вертикального Δy и бокового Δz отклонений системы (2.1) от номинала вдоль движения для способов I_1 , I_2 , а также реализации отклонений ΔW_x , ΔW_y , ΔW_z скорости ветра. Последние отвечают способу I_2 , для способа I_1 они практически те же самые. По горизонтали откладывается расстояние, пройденное по оси x . Фиг. 4 (5) соответствуют первому (второму) варианту расположения центра микровзрыва. Шаг выбора управления и помехи при моделировании был равен 0.1 с.

Видно, что результаты для минимаксного способа I_2 лучше, чем для традиционного I_1 .



Фиг. 4. Результаты моделирования процесса посадки. Координаты центра микровзрыва:
 $Dx = 3000 \text{ м}$, $Dz = 500 \text{ м}$



Фиг. 5. Результаты моделирования процесса посадки. Координаты центра микровзрыва:
 $DX = 3000$ м, $DZ = 1500$ м

8. Заключительное примечание

В заключение еще раз подчеркнем, что для расчета минимаксного способа управления не требуется каких-либо точных сведений о пространственном расположении зоны экстремальных ветровых возмущений и тем более сведений

о поле скорости ветра в такой зоне. Достаточно задать примерный размах колебаний скорости ветра относительно номинала и номинальное значение. В этом состоит принципиальное отличие подхода, основанного на теории дифференциальных игр, от методов, где указанная информация является существенной [4 - 6].

Литература

1. Кейн В. М., Париков А. Н., Смуров М. Ю. Об одном способе оптимального управления по методу экстремального прицеливания. Прикл. мат. и мех., **44**, 3 (1980), с. 434–440.
2. Титовский И. Н. Игровой подход к задаче синтеза управления самолетом при заходе на посадку. Ученые записки ЦАГИ, **XII**, 1 (1981), с. 85–92.
3. Кейн В. М. Оптимизация систем управления по минимаксному критерию. М.: Наука, 1985, 248 с.
4. Miele, A., Wang, T., Melvin, W., Optimal take-off trajectories in the presence of windshear, J. Opt. Theory and Appl., **49** (1986), No. 1, pp. 1–45.
5. Psiaki, M. L., Stengel, R. F., Optimal flight paths through microburst wind profiles, J. of Aircraft, **23** (1986), No. 8, pp. 625–635.
6. Miele, A., Wang, T., Tzeng, C. Y., Melvin, W. W., Optimal abort landing trajectories in the presence of windshear, J. Opt. Theory and Appl., **55** (1987), No. 2, pp. 165–202.
7. Красовский Н. Н., Субботин А. Н. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974, 456 с.
8. Субботин А. И., Ченцов А. Г. Оптимизация гарантии в задачах управления. М.: Наука, 1981, 288 с.
9. Боткин Н. Д., Кейн В. М., Пацко В. С. Модельная задача об управлении боковым движением самолета на посадке. Прикл. мат. и мех., **48**, 4 (1984), с. 560–567.
10. Корнеев В. А., Меликян А. А., Титовский И. Н. Стабилизация глиссады самолета при ветровых возмущениях в минимаксной постановке. Изв. АН СССР. Техн. кибернет., **3** (1985), с. 132–139.
11. Корнеев В. А. Квазиоптимальная коррекция движения самолёта на посадке при ветровых возмущениях. Изв. АН СССР. Техн. кибернет., **3** (1987), с. 180–187.
12. Зарх М. А., Пацко В. С. Стратегия второго игрока в линейной дифференциальной игре. Прикл. мат. и мех., **51**, 2 (1987), с. 193–200.
13. Боткин Н. Д., Кейн В. М., Пацко В. С. Применение методов теории дифференциальных игр к задаче управления самолетом на посадке. В кн.: Позиционное управление с гарантированным результатом. Свердловск: ИММ УрО АН СССР, 1988, с. 33–44.
14. Ivan, M., A ring-vortex downburst model for real time flight simulation of severe wind shears, AIAA Flight simulation technologies conf., 1985, July 22–24. St. Louis, Miss., 1985, pp. 57–61.
15. Диттенбергер М. А., Хейнс П. А., Луэрс Дж. К. Реконструкция условий авиакатастрофы в Новом Орлеане. Аэрокосмическая техника, **5** (1986), с. 3–15.
16. Системы цифрового управления самолетом. Под ред. А. Д. Александрова, С. М. Федорова. М.: Машиностроение, 1983, 223 с.
17. Остославский И. В., Стражева И. В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1969, 499 с.
18. Боткин Н. Д., Пацко В. С. Универсальная стратегия в дифференциальной игре с фиксированным моментом окончания. Пробл. управления и теории информ., **11**, 6 (1982), с. 419–432.
19. Боткин Н. Д., Пацко В. С. Позиционное управление в линейной дифференциальной игре. Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, **4** (1983), с. 78–85.
20. Алгоритмы и программы решения линейных дифференциальных игр. Свердловск, 1984, 295 с. (Материалы по мат. обеспечению ЭВМ/АН СССР. УНЦ, ИММ).

PRINTED IN HUNGARY

Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat, Budapest