УДК 518.9

А.А. Белоусов, Ф.В. Грищук, В.В. Кулешин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИГРОВОГО ПОДХОДА В АВТОМАТИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ВЗЛЕТА САМОЛЕТА

Предложен математический алгоритм коррекции работы двигателей самолета на этапе разбега. Алгоритм обеспечивает выдерживание требуемых характеристик разбега с учетом действия возмущений при взлете самолета на пониженных режимах работы двигателей. В основе математических средств лежит игровой подход к управлению динамической системой. Приведены результаты сравнительного моделирования взлета тяжелого транспортного самолета при наличии возмущений.

Введение

Взлет самолета состоит из двух основных участков: наземного и воздушного. Характеристики выполнения наземного участка (разбега) определяются в зависимости от высоты и температуры аэродрома, величины и направления ветра, длины, коэффициента трения и уклона взлетно-посадочной полосы (ВПП), режима работы двигателей и взлетной массы самолета.

Непосредственное определение характеристик разбега выполняется с помощью заранее рассчитанных для конкретного типа самолета и приведенных в его Руководстве по летной эксплуатации (РЛЭ) номограмм. Когда взлетная масса самолета меньше максимально допустимой, номограммы предусматривают расчет характеристик взлета при пониженном (относительно максимального) режиме работы двигателей. Это позволяет экономить ресурс работы двигателей и топливо. Однако процедура использования номограмм весьма трудоемкая и требует большой точности и педантичности. Поэтому, как правило, взлет самолетов, независимо от условий, осуществляется при работе двигателей на взлетном режиме.

Автоматизация использования номограмм решает лишь вопрос предварительного расчета характеристик взлета с использованием пониженных режимов работы двигателей, но не гарантирует выдерживания заданных значений характеристик разбега в его процессе. Это объясняется тем, что в номограммах нельзя учесть все возможные отклонения значений реальных характеристик аэродрома, самолета и, в частности, двигателей от их ожидаемых или заявленных значений. Поэтому для обеспечения безопасного взлета самолета при работе двигателей на пониженных режимах актуальна задача разработки математического алгоритма коррекции работы двигателей в целях выдерживания требуемых значений характеристик разбега с учетом действия возмущений.

Обоснование игрового подхода

Основными характеристиками разбега являются зависимость тяги, скорости $v(t)$ и пройденного пути $l(t)$ от времени t. С помощью номограмм можно определить значения характерных скоростей при разбеге самолета по ВПП (скорость безопасного прекращения взлета самолета, подъема передней опоры, взлета самолета), длину разбега до подъема передней опоры L и другие характеристики расстояния, проходимого самолетом при разбеге. С помощью данных номограмм и математического моделирования можно заранее рассчитать необходимую для безопасного взлета зависимость скорости разбега от пройденного пути. Назовем эту зависимость эталонной и обозначим $v_э(l)$ $(l \in (0, L))$. Если текущее изменение скорости по длине разбега $v(l)$ меньше эталонного (заданного), то самолет может выкатиться за пределы ВПП, так и не взлетев. Задача управления состоит в том, чтобы компенсировать это отклонение так, чтобы выполнялось условие

$$\Delta v(L) = v(L) - v_э(L) \geq 0, \tag{1}$$

которое гарантирует, что скорость взлета самолета будет не меньше эталонной (Δv — изменение скорости взлета).

Ограничим изучение задачи участком разбега до подъема передней опоры. На этом участке самолет движется прямолинейно, практически без изменения углового положения. Поэтому решение задачи управления сравнительно простое, а в качестве управления рассматривается изменение силы тяги двигателей. Полагаем, что отклонение скорости $\Delta v(l)$ вызвано неким возмущением тяги двигателей $q(l)$ (относительно эталонной), а управлять мы можем также тягой, увеличивая или уменьшая ее относительно эталонной на величину $p(l)$.

Таким образом, возникает типичная игровая задача [1–3]: на управляемую динамическую систему оказывается возмущающее воздействие $q(l)$ и требуется управлять системой $p(l)$ так, чтобы выполнялись терминальные условия (1).

Ввиду этого величина Δv относительно $v_э(l)$ небольшая. Задачу управления можно решать на основе линеаризованных уравнений движения самолета по ВПП. В рассматриваемом случае удобно использовать линеаризованные траекторные уравнения движения центра масс самолета в продольном канале [4]. При замене независимой переменной t на переменную l получается одно дифференциальное уравнение в отклонениях от $v_э(l)$, которое имеет следующий вид:

$$\begin{gathered}\frac{d\Delta v}{dl} = a(l)\,\Delta v + b(l)(p(l) + q(l)), \;\; \Delta v(0) = 0, \\ a(l) = -\left(k_1 + \frac{dv_э(l)}{dl}\frac{1}{v_э(l)}\right), \;\; b(l) = k_2\frac{1}{v_э(l)},\end{gathered} \tag{2}$$

k_1, k_2 — постоянные коэффициенты, зависящие от массы, аэродинамических характеристик самолета и условий аэродрома.

Построение корректирующего управления

Для определения управления, корректирующего движение самолета в процессе разбега, используем формулу Коши в следующем виде [5]:

$$X^{-1}(l)\,\Delta v(l) = \int_0^l X^{-1}(s)\,b(s)[p(s)+q(s)]\,ds,$$

где $X(l) = e^{\int_0^l a(s)ds}$ — решение однородного уравнения:

$$\frac{dX}{dl} = a(l)\,X, \quad X(0) = 1.$$

Управление будем строить как кусочно-постоянную функцию, поделив участок $[0, L]$ на несколько интервалов:

$$p(l) = \{\,p_k\,, l \in [l_{k-1}, l_k], l_0 = 0, l_N = L,\ k = \overline{1, N}\}.$$

Тогда

$$X^{-1}(L)\,\Delta v(L) = \sum_{k=1}^{N} \int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)\,b(s)[p_k + q(s)]\,ds =$$

$$= \sum_{k=1}^{N} \left\{ a_k\,p_k + \int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)\,b(s)\,q(s)\,ds \right\},$$

где $a_k = \int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)\,b(s)\,ds$.

Поскольку возмущение $q(s)$ неизвестно, а известно лишь изменение скорости $\Delta v(s)$, восстановим по нему $q(s)$. Для этого запишем следующую разность для k-го участка:

$$X^{-1}(l_k)\,\Delta v(l_k) - X^{-1}(l_{k-1})\,\Delta v(l_{k-1}) = a_k\,p_k + \int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)\,b(s)\,q(s)\,ds.$$

Из этого выражения следует, что

$$\int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)\,b(s)\,q(s)\,ds =$$

$$= X^{-1}(l_k)\,\Delta v(l_k) - X^{-1}(l_{k-1})\,\Delta v(l_{k-1}) - a_k\,p_k,\ k = 1,\dots, N. \qquad (3)$$

Величину (3) можно считать результатом воздействия возмущения $q(s)$ на интервале $[l_{k-1}, l_k]$.

Управление p_{k+1} на каждом из N интервалов будем выбирать таким образом, чтобы компенсировать результаты действия возмущения на предыдущем интервале:

$$p_1 = 0, \quad \int_{l_{k-1}}^{l_k} X^{-1}(s)b(s)q(s)ds + a_{k+1}p_{k+1} = 0, \; k = 1,\ldots, N-1. \qquad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), получаем итеративную процедуру для вычисления p_{k+1}:

$$a_{k+1}p_{k+1} + X^{-1}(l_k)\,\Delta v(l_k) = a_k p_k + X^{-1}(l_{k-1})\,\Delta v(l_{k-1}), \; k = 1,\ldots, N-1.$$

Отсюда, учитывая $p_1 = 0$ и $\Delta v(0) = 0$, получаем соотношение для нахождения p_{k+1}:

$$a_{k+1}p_{k+1} + X^{-1}(l_k)\,\Delta v(l_k) = 0, \; k = 1,\ldots, N-1. \qquad (5)$$

Отметим, что возможные значения увеличения тяги двигателей p_{k+1} ограничены максимальным значением суммарной тяги двигателей, которая зависит от высоты аэродрома, температуры воздуха и т.д.

Уточненная конструкция

Построенное таким образом (5) управление p_{k+1} $(k = 1,\ldots, N-1)$ обеспечивает гарантированную нейтрализацию действия возмущений на интервале $[0,\; l_{N-1}]$. Но предложенный способ управления не позволяет компенсировать отклонения скорости разбега на последнем интервале. Тем не менее ясно, что время прохождения конечного участка разбега $[l_{N-1}, L]$ сравнительно невелико (в силу высокой эталонной скорости $v_{\text{у}}(l)$ на этом участке). Поэтому отклонение скорости, вызванное воздействием возмущения $q(l)$ на этом участке, не должно быть большим и его можно оценить априорно

$$X(L) \int_{l_{N-1}}^{L} X^{-1}(s)b(s)q(s)ds \geq -\delta$$

для некоторого положительного числа δ. Значение величины δ должно определяться особо в каждом конкретном случае, например, по результатам обработки статистической информации.

Для гарантированного парирования отклонения скорости $\Delta v(L)$, которое может возникнуть из-за возмущений на конечном интервале разбега, предлагается на каждом из интервалов $[l_{k-1}, l_k]$ $(k = 1,\ldots, N)$ к указанной тяге p_k (5) добавлять еще некую величину p_k^* так, чтобы выполнялось неравенство

$$\sum_{k=1}^{N} a_k p_k^* \geq X^{-1}(L)\,\delta. \qquad (6)$$

Тогда суммарное воздействие тяги $p(l) = \{ p_k + p_k^*, l \in [l_{k-1}, l_k), k = 1, N\}$ гарантирует выполнение терминального условия $\Delta v(L) \ge 0$ для допустимого возмущения $q(l),\ l \in [0, L]$.

Отметим, что выбирать компенсирующее управление $p_k^*,\ k = 1, \dots, N$, которое удовлетворяет условию (6), можно разными способами, например, исходя из критерия минимизации величины максимальной тяги:

$$\max_{k=1,\dots,N} | p_k^* | \to \min.$$

Тогда

$$p_k^* = \operatorname{sign}(a_k) \frac{X^{-1}(L)\delta}{\sum_{i=1}^{N} | a_i |},\ k = 1, \dots, N,$$

где $\operatorname{sign}(\cdot)$ — знак числа.

Можно исходить из критерия минимизации суммарной тяги

$$\sum_{k=1}^{N} | p_k^* | \to \min$$

при

$$p_j^* = \frac{X^{-1}(L)\delta}{a_j},\ p_k^* = 0 \text{ при } k \ne j,\ k = 1, \dots, N,$$

где j — один из номеров, на котором достигается максимум чисел $|a_k|$, $k = 1, \dots, N$. Возможны и более сложные критерии.

Результаты моделирования

Эффективность предложенных подходов к обеспечению безопасности взлета самолета в условиях возможных возмущений проверялась моделированием процесса разбега самолета Ан-124 «Руслан». Моделирование проводилось в программной среде MATLAB.

На рис. 1–4 представлены зависимости $v(l)$ в сравнении с зависимостями $v_э(l)$, полученные математическим моделированием движения тяжелого транспортного самолета при разбеге. Рассмотрены случаи движения самолета при следующих изменениях относительно эталонных характерристик:

1) уменьшение силы тяги двигателей на 5 % (рис. 1);

2) увеличение взлетной массы на 4 % (рис. 2);

3) увеличение силы трения–качения на 7 % (рис. 3);

4) совместного действия уменьшение силы тяги двигателей на 3 %, увеличение взлетной массы на 1 % и увеличение силы трения–качения на 4 % (рис. 4).

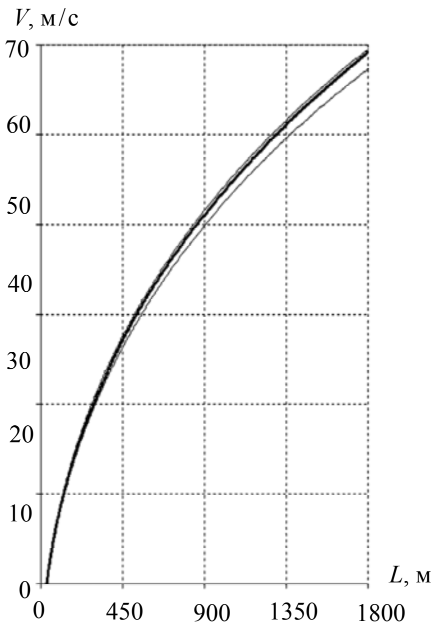

Рис. 1

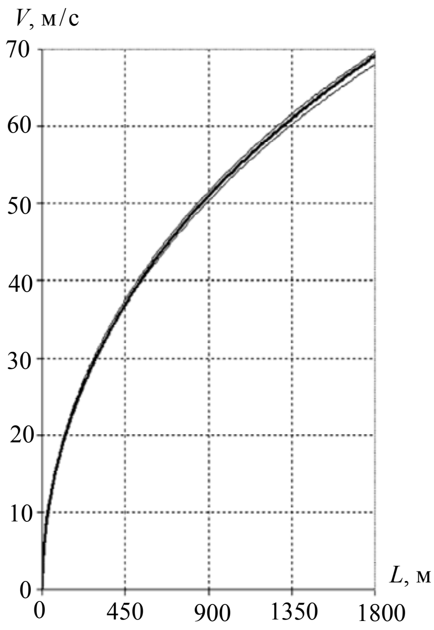

Рис. 2

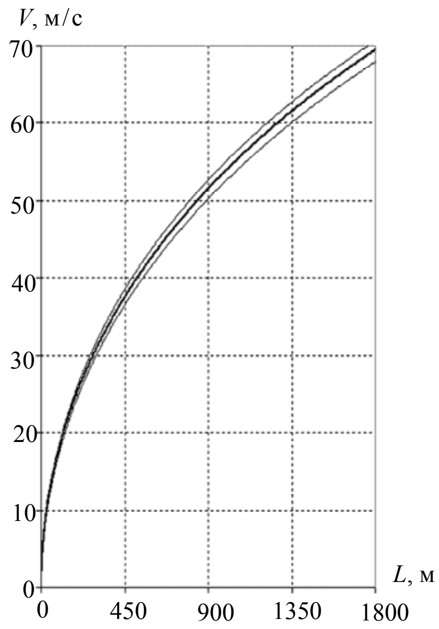

Рис. 3

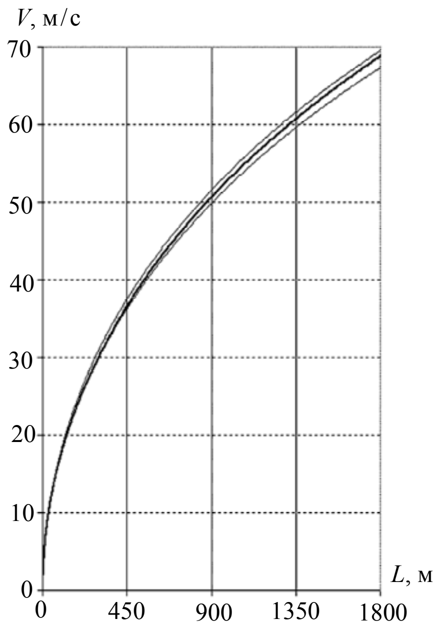

Рис. 4

На рисунках отражена зависимость скорости от расстояния, пройденного самолетом (при разбеге) при отсутствии и наличии отклонения силы тяги двигателей, массы самолета и коэффициента трения–скольжения от эталонных значений при наличии и отсутствии корректирующего управления. На каждом из рисунков верхняя кривая является эталонной зависимостью $v_э(l)$, нижняя — зависимостью $v(l)$, полученной при отсутствии компенсирующего управления, и средняя (выделенная) — при наличии компенсирующего управления.

Из сравнения полученных зависимостей видно, что при отсутствии корректирующего управления (нижние кривые) значения $v(L)$ меньше значения $v_э(l)$ на 1,3–2,3 м/с. А при наличии управления (средние кривые), определенного в соответствии с (5) и (6), отклонения в скорости практически устраняются.

Важным фактором, который может повлиять на возможность практической реализации предлагаемого управления, является запаздывание в изменении силы тяги двигателей. Для оценки влияния этого фактора запаздывание в изменении силы тяги двигателей моделировалось введением инерционных звеньев с постоянными времени 1 и 2 с. Результаты расчетов показывают, что и в этом случае отклонения в скорости практически устраняются.

Заключение

Таким образом, предложенный способ управления тягой двигателей на разбеге, основанный на игровом подходе, обеспечивает выдерживания требуемых характеристик скорости разбега при действии различных возмущений.

1. *Чикрий А.А.* Конфликтно-управляемые процессы. — Киев: Наук. думка, 1992. — 384 с.
2. *Понтрягин Л.С.* Избранные научные труды. Т. 2. — М.: Наука, 1988. — 576 с.
3. *Красовский Н.Н.* Игровые задачи о встрече движений. — М.: Наука, 1970. — 420 с.
4. *Лысенко Н.М.* Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов. — М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1967. — 565 с.
5. *Беллман Р.* Введение в теорию матриц. — М.: Наука, 1969. — 368 с.

Институт кибернетики имени В.М. Глушкова
НАН Украины, Киев,
Государственный научно-исследовательский
институт авиации, Киев

Получено 12.06.2009