

УДК 531.34:629.7.015.017.2

©2002. В.А. Гончаренко, В.И. Гончаренко

ВЛИЯНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭКИПАЖА

Обосновывается необходимость обеспечения запасов устойчивости движения самолета по взлетно-посадочной полосе на этапе выбора схемы самолета и его шасси. Для оценки показателя устойчивости необходимы коэффициенты увода шин, величины податливостей стоек шасси и характеристики вертикального оперения.

Введение. Для колесного экипажа с пневматическими шинами имеется опасность потери устойчивости прямолинейного движения. Это происходит при скорости движения, превышающей критическое значение, определяемое параметрами самого экипажа. Вопросы устойчивости движения по земле самолета как колесного экипажа также являются актуальными. Решению этой задачи уделили внимание А.Клемин [1], Н.Г.Четаев [2] и его аспирант А.Р.Рохов [3], И.В.Остославский и И.В.Стражева [4] и другие. Данная проблема остается актуальной до настоящего времени (см. [5]).

Отметим, что все колесные экипажи делятся на два класса: с недостаточной и избыточной поворачиваемостью. Принадлежность тому или иному классу определяется положением относительно центра масс экипажа равнодействующей сил увода при одинаковых углах увода всех шин и зависит только от расположения центра масс экипажа и коэффициентов сопротивления боковому уводу шин. Равнодействующая сил сопротивления качения колес с уводом, вообще говоря, не проходит через центр масс экипажа. Это является следствием двух факторов: во-первых, силы увода непропорциональны нормальным силам на колесе, во-вторых, равнодействующая нормальных сил на колесах не проходит через центр масс экипажа, что характерно для самолетов. К первому классу относятся экипажи, для которых равнодействующая сил увода находится позади их центров масс, и поэтому силы увода оказывают стабилизирующее действие. Для второго класса экипажей равнодействующая сил увода находится впереди центров масс экипажей, и поэтому силы увода стремятся еще больше увеличить угол увода, следовательно их действие оказывается дестабилизирующим.

Самолетам, как колесным экипажам, присуще свойство избыточной поворачиваемости. Поэтому во время разбега при взлете или пробеге при посадке, когда реализуются большие скорости движения, такой собственно колесный экипаж, то есть без учета аэродинамических сил, был бы неустойчив по курсу [6]. И управлять им было бы затруднительно, несмотря на конечный интервал времени разбега и пробеге. Стабилизирующим фактором в реальной системе являются аэродинамические силы на вертикальном оперении.

Параллельно с развитием скоростных автомобилей изучалось движение автомобиля с учетом аэродинамического воздействия и обращалось внимание на поведение движущегося автомобиля при боковых порывах ветра, например, [7, 8]. В настоящее время отсутствуют надежные методы для предсказания удовлетворительного поведения самолета на взлетно-посадочной полосе (ВПП). Поэтому необходимо выяснить роль аэродинамических эффектов и выявить требования к характеристикам вертикального оперения, исходя из условия устойчивости движения самолета по ВПП.

Анализ устойчивости движения экипажа. Для исследования устойчивости движения самолета по ВПП будем использовать "велосипедную" модель колесного экипажа, в кото-

рой дополнительно учитываются аэродинамические силы на вертикальном оперении. По структуре уравнений движения эта модель идентична модели экипажа с дополнительной осью колес вместо вертикального оперения, на которой реализуется коэффициент сопротивления уводу колес, пропорциональный квадрату скорости. Вследствие такой квадратичной зависимости следует ожидать малое отличие в поведении самолета от собственно колесного экипажа с избыточной поворачиваемостью при малых скоростях движения и незначительное отличие при больших скоростях движения от поведения собственно колесного экипажа с дополнительной эквивалентной осью колес вместо вертикального оперения, обладающего недостаточной поворачиваемостью. Это означает, что запас устойчивости колесного экипажа с вертикальным оперением резко падает по скорости движения в диапазоне малых скоростей и значительно растет при больших скоростях. Величина запаса устойчивости при средних скоростях определяется из анализа уравнений движения экипажа.

Рассмотрим малые возмущения экипажа: v – боковая скорость центра масс, ω – угловая скорость экипажа. В проекциях на оси связанной системы координат уравнения возмущенного движения имеют вид

$$M(\dot{v} - U\omega) = P_f + P_r + P_a, \quad J\dot{\omega} = -aP_f + bP_r + \ell P_a. \quad (1)$$

Здесь $P_f = -K_f(v - a\omega)/U$ и $P_r = -K_r(v + b\omega)/U$ – силы увода на осях передних и основных колес; сила на вертикальном оперении, например, в предположении, что работающие двигатели не искажают его обтекание набегающим потоком, $P_a = -C_a U^2(v + \ell\omega)/U$.

Остальные обозначения близки к общепринятым: M – масса экипажа, J – момент инерции экипажа, U – скорость невозмущенного движения экипажа. Расстояние от центра масс экипажа: до оси передних колес равно a , до оси основных колес – b , до вертикального оперения – ℓ . Суммарный коэффициент сопротивления уводу передних колес – K_f , основных колес – K_r , коэффициент аэродинамической силы на вертикальном оперении – C_a . Этих параметров достаточно, чтобы выявить основные взаимосвязи, обеспечивающие курсовую устойчивость.

Устойчивость экипажа относительно возмущений v и ω определяется знаком свободного члена характеристического уравнения системы (1). Нормированное значение этого коэффициента относительно парциальных показателей затухания таково

$$f_o = \frac{B^2 K_f K_r - (aK_f - bK_r - \ell C_a U^2) M U^2 + C_a U^2 (\ell_a^2 K_f + \ell_b^2 K_r)}{(K_f + K_r)(a^2 K_f + b^2 K_r)},$$

или

$$f_o = \frac{\frac{K_r}{K_f} - \left\{ \left(\frac{a}{B} - \frac{b}{B} \frac{K_r}{K_f} \right) \frac{M}{B} - C_a \left[\left(\frac{\ell_a}{B} \right)^2 + \left(\frac{\ell_b}{B} \right)^2 \frac{K_r}{K_f} \right] \right\} \frac{U^2}{K_f} + \frac{\ell}{B} C_a \frac{M}{B} \left(\frac{U^2}{K_f} \right)^2}{\left(1 + \frac{K_r}{K_f} \right) \left[\left(\frac{a}{B} \right)^2 + \left(\frac{b}{B} \right)^2 \frac{K_r}{K_f} \right]}.$$

Здесь $B = a + b$ – расстояние между осями передних и основных колес (база шасси), $\ell_a = \ell + a$ – расстояние от вертикального оперения до передних колес, $\ell_b = \ell - b$ – расстояние до основных колес.

Зависимость коэффициента $f_o(U^2)$ от U^2 представляет собой параболу. Для самолетов обычных схем величина $aK_f - bK_r > 0$, то есть они обладают избыточной поворачиваемостью. Поэтому коэффициент f_o с ростом скорости U вначале убывает, достигает минимального значения и затем возрастает. Потеря устойчивости движения экипажа возможна, если в диапазоне реализуемых скоростей минимальное значение величины f_o является отрицательным.

Следует отметить, что опасным является не столько сам факт отрицательности коэффициента f_o , сколько его величина. Величина отрицательного коэффициента f_o характеризует скорость нарастания возмущений, при значительной величине которой пилоту становится трудно парировать возмущения посредством руля направления и поворота передних колес шасси.

Если вертикальное оперение полностью находится в струе работающих двигателей, например, при взлете, и скорость U_s воздушной струи достаточно велика, то сила на вертикальном оперении $P_a = -C_a U_s^2 \ell \omega / U_s$. В этом случае устойчивость экипажа характеризует коэффициент

$$f_e = \frac{B^2 K_f K_r - (a K_f - b K_r) M U^2 + \ell C_a U_s U (\ell_a K_f + \ell_b K_r)}{(K_f + K_r) (a^2 K_f + b^2 K_r)}.$$

Поскольку значение величины f_e , начиная с некоторого значения скорости U , принимает отрицательные значения, то в рассматриваемом случае движение экипажа является неустойчивым при больших скоростях.

Если вертикальное оперение полностью находится в тени от "воздушного тела", возникающего при реверсировании тяги двигателей при посадке, то аэродинамическими силами на вертикальном оперении можно пренебречь. Поэтому в данном случае устойчивость характеризует тот же коэффициент, что и собственно колесный экипаж:

$$f_a = \frac{B^2 K_f K_r - (a K_f - b K_r) M U^2}{(K_f + K_r) (a^2 K_f + b^2 K_r)}.$$

Обычно при малых скоростях движения колесного экипажа с вертикальным оперением действительное значение коэффициента устойчивости $f_{real} \sim f_a$. При больших скоростях движения колесного экипажа с вертикальным оперением происходит приглаживание струй от двигателей и сжатие "воздушного тела", возникающего при реверсировании тяги двигателей, вследствие этого $f_{real} \sim f_o$.

Таким образом, самолет как собственно колесное транспортное средство обладал бы свойством потери устойчивости прямолинейного движения по ВПП при возрастании скорости. Фактически устойчивость движения обеспечивается за счет аэродинамического воздействия на вертикальное оперение. Поэтому изменение его обтекания за счет струи от двигателя или затенение вертикального оперения от набегающего потока "воздушным телом" при реверсе тяги двигателя могут существенно уменьшать запасы устойчивости движения самолета по земле.

Требование устойчивости движения самолета по ВПП должно быть учтено на этапе выбора схемы самолета и его шасси. Для этого необходимы обобщенные коэффициенты сопротивления уводу шин, установленных на упругих стойках шасси, и характеристики вертикального оперения самолета.

Выводы.

1. Существует достаточное условие устойчивости движения самолета по ВПП:

$$(a K_f - b K_r) M U^2 \leq B^2 K_f K_r$$

для всех возможных значений скоростей U . Это требование может быть невыполнимым для реальных конструкций.

2. Требование положительности величины f_o является только необходимым условием устойчивости движения.

3. С целью подтверждения устойчивости движения создаваемого самолета необходимо выполнять анализ для ожидаемых значений степени обтекания вертикального оперения воздушными струями от двигателей и для различной степени затенения вертикального оперения во время реверса тяги двигателей.

1. *Klemin A.* The phenomenon of ground looping. Uncontrollable fast turns on the ground when the rudder is ineffective // *Aircraft Engineering*. – 1935. –7, No.174, April. – P. 81 – 85, 90.
2. *Байков А.А.* Академия наук СССР за 25 лет // Юбилейная сессия Академии наук СССР, посвященная 25-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Докл. на общем собрании юбилейной сессии Академии наук СССР. 15–18 ноября 1942 года. – М. –Л.: Изд-во АН СССР, – 1943. – С. 28–53.
3. *Рохов А.Р.* Об устойчивости движения самолета по земле // Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: ЦАГИ, 1949. – 5 с.
4. *Остославский И.В., Стражева И.В.* Динамика полета. Устойчивость и управляемость летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1965. – 467 с. (С. 383–395.)
5. *Abzug M.J.* Directional stability and control during landing rollout // *Journal of Aircraft*. – 1999. –36, No.3. – P. 584 – 590.
6. *Певзнер Я.М.* Теория устойчивости автомобиля // Вторая науч. сессия НАТИ: 17–20 декабря 1945 г. – М.: ОТИ НАТИ, 1945. – С. 65–87.
7. *Riekert P., Schunck T.E.* Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs // *Ingenieur-Archiv*. – 1940. –11, H.3 – S. 210 – 224.
8. *Slibar.A., Paslay P.R.* Behavior of vehicles subjected to wind gusts // *Ingenieur-Archiv*. – 1959. –28 – S. 313 – 326.

Национальный техн. ун-т Украины, Киев
АНТК им. О.К. Антонова, Киев
gonchavi@brown.kiev.ua

Получено 30.10.02