

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПИЛОТА ВОЗДУШНОГО СУДНА НА КРИТИЧЕСКИХ ЭТАПАХ ПОЛЕТА

А.М. Шевченко

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: anshev2@ipu.ru

Б.В. Павлов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: pavlov@ipu.ru

Г.Н. Начинкина

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: nach_gala@ipu.ru

Ключевые слова: энергетический подход, разбег на взлете, торможение на посадке, прогнозирование дальности, точка принятия решения.

Аннотация: Методы основаны на энергетическом подходе к управлению полетом и уравнении баланса энергий, которое описывает процесс изменения полной энергии самолета на всей траектории, включая впередилежащий участок. На этапе взлета прогнозирующий алгоритм вычисляет положение самолета на взлетно-посадочной полосе, после которого возможен разгон до скорости устойчивого горизонтального полета и набор высоты для преодоления высотного препятствия. На этапе приземления определяется длина тормозного пути. Результаты моделирования алгоритмов в широком диапазоне ситуаций подтвердили возможность заблаговременного извещения пилота о возможности продолжения безопасного взлета или посадки.

1. Концепция управления полной энергией движения.

В отличие от традиционного описания пространственного движения ЛА в переменных состояния движение ЛА с позиций энергетического подхода описывается в терминах его полной энергии и её составляющих – потенциальной и кинетической. [1,2]

В соответствии с этой концепцией управление формируется в функции отклонений ΔE полной энергии E от заданного значения E_z . В дальнейшем для описания всех энергетических переменных будем использовать понятие удельной энергии

$$H_E(*) = E(*)/(mg) = h + V^2/(2g).$$

Математической формулировкой энергетического подхода является **уравнение баланса энергий**, записанное в форме приращений удельной энергии движения:

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{дв} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^{торм} + \Delta H_E^W.$$

Это уравнение устанавливает количественные соотношения между источником энергии и всеми её потребителями.

Единицей измерения удельной энергии служит метр, поэтому она называется также энергетической высотой. Уравнение содержит члены: ΔH_E – приращение энергетической высоты, ΔH_E^{AB} – удельная работа двигателя, ΔH_E^D – затраты энергии на преодоление силы лобового сопротивления, ΔH_E^W – работа ветра. Для этих членов уравнения баланса энергий в работах [2-4] получены интегральные выражения.

На режимах движения по ВПП возникают силы сопротивления со стороны опор шасси. Поэтому уравнение баланса энергий было обобщено на наземные режимы путем добавления члена $\Delta H_E^{\text{ТОРМ}}$, отражающего процесс поглощения энергии на преодоление механических сил торможения:

$$\Delta H_E^{\text{ТОРМ}} = \int_{t_1}^{t_2} V k_{\text{ТОРМ}} dt,$$

где $k_{\text{ТОРМ}}$ – обобщенный нормированный коэффициент торможения, равный отношению суммарной силы сопротивления со стороны шасси к весу самолета.

2. Энергетический метод прогнозирования безопасного пролета над препятствием

В момент пролета над препятствием самолет должен иметь скорость не ниже минимальной скорости устойчивого горизонтального полета V_2 , известной для каждого типа самолетов. Таким образом, полная энергия движения в момент преодоления препятствия $E_{H_{\text{преп}}}$ должна содержать необходимый минимум кинетической составляющей и запас потенциальной составляющей, которая и определяют достижимую высоту $H_{\text{преп}}$ пролета над препятствием:

$$(1) \quad E_{H_{\text{преп}}} = m \frac{(V_2)^2}{2} + mgH_{\text{преп}}.$$

Величина полной энергии складывается из текущих кинетической и потенциальной составляющих и работы всех внешних сил F_i на траектории маневра. Тогда спрогнозированная накопленная энергия на траектории длиной S :

$$(2) \quad E(t)_{\text{прог}} = m \frac{V(t)^2}{2} + mgh(t) + S \sum_i F_i(t),$$

где $\sum_i F_i(t)$ – сумма всех внешних сил: тяги двигателя, аэродинамического сопротивления, трения качения и силы торможения. В предлагаемой методике результирующая сила естественным образом вычисляется через продольную перегрузку

$$(3) \quad \sum_i F_i = mgn_x(t)$$

Приравняв выражения для необходимой (1) и прогнозной (2) энергий с учетом измерений (3), в процессе разбега можно найти длину $D_{\text{ТПР}}(t)$ впередилежащего участка траектории до точки принятия решения (ТПР), необходимого для накопления недостающей полной энергии:

$$D_{\text{ТПР}}(t) = \left(g(H_{\text{преп}} - h(t)) + 0.5(V_2^2 - V(t)^2) \right) / gn_x(t) - L_{\text{преп}}.$$

Расстояние этой точки от переднего обреза ВПП:

$$X_{\text{ТПР}}(t) = X(t) + D_{\text{ТПР}}(t),$$

где $X(t)$ – текущая координата самолета.

В отличие от методики взлета, предписываемой руководствами по летной эксплуатации, метод прогнозирования полной энергии указывает на возможность взлета не в момент достижения скорости принятия решения, а намного раньше и в координатах дальности, привязанных к взлетной полосе.

Для повышения ситуационной осведомленности весьма полезным считается знание запаса, или резерва, дальности до обреза взлетной полосы в точке принятия решения. Величина резерва также прогнозируется в процессе разбега:

$$L_{\text{рез}}(t) = L_{\text{ВПП}} - X(t) - D_{\text{ТПР}}(t),$$

где $L_{\text{ВПП}}$ – длина ВПП.

Объективная оценка этой дальности, в отличие от интуитивной, улучшает ситуационную осведомленность пилота и снижает предпосылки для ошибочных действий. В процессе разбега пилоту может выдаваться сообщение о дальности до точки подъема передней стойки.

Отличительной особенностью энергетического метода прогнозирования является то, что в текущем прогнозе учитывается полная энергия, приобретаемая самолетом на воздушном сегменте за пределами наземного участка.

3. Метод прогнозирования дистанции безопасного торможения

В пределах наземного участка траектории, т.е. на этапах пробега после приземления или разбега перед взлетом, могут возникать ситуации, требующие введения режима экстренного торможения. В таких ситуациях существует опасность выкатывания за пределы ВПП. В условиях дефицита времени необходимо оценить возможность экстренного торможения и останова в пределах ВПП или ухода на второй круг.

Длину тормозного пути определим как расстояние, на котором скорость движения будет погашена от текущей до некоторой малой величины ε .

Выбрав критерий останова $V(t) \leq \varepsilon$, найдена прогнозная длина тормозного пути:

$$D_{\text{торм}} = S(t)_{\text{прог}} = 0,5 (V^2(t) - \varepsilon^2) / gn_x(t).$$

По вычисленной оценке в поле зрения пилота может быть сгенерировано сообщение о резерве дистанции безопасного торможения:

$$L_{\text{резерв}} = L_{\text{ВПП}} - x(t) - D_{\text{торм}}$$

Очевидно, что информативность и применимость прогноза для повышения ситуационной осведомленности тем выше, чем более достоверны прогнозные оценки параметров движения по отношению к их реальным значениям.

Наиболее простой и очевидный прогноз дистанции торможения вычисляется в процессе движения самолета по ВПП, основываясь на текущих энергетических характеристиках и действующих силах.

В процессе движения все силы меняются в соответствии с изменением скоростного режима или по какой-либо программе. Таким образом, прогноз не может совпадать с реальным процессом и всегда содержит погрешность или неопределенность. Для повышения достоверности прогноза предлагается эффективный метод коррекции алгоритмов прогнозирования путем введением в алгоритм прогнозирования коэффициента коррекции ($Q_{\text{кор}}$) результатов прогнозирования, полученных по текущим параметрам движения воздушного судна.

Корректированная длина тормозного пути находится в виде

$$D_{\text{торм_кор}} = Q_{\text{кор}} D_{\text{торм}}$$

При этом

$$Q_{\text{кор}} = Q_{\text{кор}}(J_i, V),$$

где J_i – признак режимов, V – скорость качения.

Идентификаторами режимов являются логические переменные: $J_{\text{рев}} = 1$ на режиме реверса тяги двигателя и $J_{\text{инт}} = 1$ на режиме качения с выпущенными интерцепторами

Коэффициент коррекции также различается по режимам

$$Q_{\text{кор}} = \begin{cases} Q_{\text{рев}}, & \text{if } J_{\text{рев}} = 1, \\ Q_{\text{инт}}, & \text{if } J_{\text{инт}} = 1. \end{cases}$$

На реверсном участке наибольшее влияние на ошибки прогнозирования имеют коэффициент сцепления $k_{\text{сц}}$, который и сообщается на борт, а коэффициент коррекции на участке максимального реверса $Q_{\text{рев}}$ в явном виде учитывал именно эти факторы

$$Q_{\text{рев}} = k_{\text{рев}}(k_{\text{сц}}) \cdot k_{\text{рев}}(V).$$

На участке пробега с выпущенными интерцепторами коррекция достигалась простым масштабированием оптимальных коэффициентов по массе, нормированной средней посадочной массой $m_{\text{норм}} = m/m_{\text{сред}}$. После уборки интерцепторов коэффициент коррекции снова менял масштаб.

Зависимость коррекции от скорости была найдена в виде

$$k_{\text{рев}}(V) = k_1(k_0 + (1 - k_0)V/V_n)$$

где V_n – начальная скорость торможения, Настроечные коэффициенты k_0 и k_1 определялись поиском на множестве полетных условий по критерию минимума средней погрешности прогноза на реверсном участке.

Такой метод раздельной коррекции в зависимости от используемых средств торможения показал хорошую степень приближения прогнозных оценок к фактической траектории.

4. Заключение

Разработана методика проектирования алгоритмов прогнозирования терминальных состояний во время выполнения взлетно-посадочных операций. На режиме взлета при наличии высотных препятствий по курсу разработан и исследован метод прогнозирования положения самолета на взлетно-посадочной полосе для начала подъема носовой стойки и для продолжения взлета. Возможность взлета с гарантированным пролетом над препятствием обосновывается раньше, чем достигается скорость принятия решения, диктуемая руководством по летной эксплуатации. Информационное сообщение о резерве разбега, сформированное в поле зрения пилота, позволит ему соотнести текущую ситуацию с положением самолета на полосе, что улучшит ситуационную уверенность и снизит стрессовые нагрузки.

На режиме торможения - это состояние останова или качения на малой скорости руления для причаливания к терминалу выхода. Процесс торможения происходит под действием разных меняющихся источников сил, в том числе устройств реверсирования тяги, интерцепторов и сопротивления шасси. Поэтому алгоритм прогнозирования дополнен алгоритмом коррекции результатов на каждом из трех типовых участках траектории. Правдоподобие прогноза в работе подтверждено статистическими испытаниями.

Список литературы

1. Rallo N. Runway safety: the big picture // ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, November 6-8, 2012.
2. Sharov V. Development of Overrun Prognosis System in Volga-Dnepr Airline // ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, November 6-8, 2012.

3. Jarinov S. Role of the Regulator // ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, November 6-8, 2012.
4. Шаров В. Д. Методика оценки вероятности выкатывания воздушных судов за пределы ВПП при посадке // Научный вестник МГТУ Гражданской Авиации. 2007, № 122.
5. Reducing the Risk of Runway Excursions // Runway Safety Initiative. Flight Safety Foundation. May, 2009.
6. Evaluation of aircraft braking performance on winter contaminated runways and prediction of aircraft landing distance using the Canadian runway friction index. // Flight Research Laboratory. Ottawa, Ontario, Canada, 2002. P. 1-66.
7. Shevchenko A.M. Some Means for Informational Support of Airliner Pilot // 5th Int. Scientific Conf. on Physics and Control (Physcon 2011). Leon, Spain. Sept. 5-8, 2011. P. 1-5 <http://lib.physcon.ru/doc?id=78f90e41e746/>.
8. Kuznetsov A., Shevchenko A., Solonnikov Ju. The Methods of Forecasting Some Events During the Aircraft Takeoff and Landing // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 46, No. 19. P. 183-187.
9. Шевченко А. М. Разработка и исследование метода прогнозирования дистанции пробега самолета на посадке. // Мехатроника, автоматизация, управление 2015. Т. 16, № 12. С. 841-847.
10. Kurdjukov A.P., Nachinkina G.N., Shevtchenko A.M. Energy Approach to Flight Control // AIAA Conf. Navigation, Guidance & Control. AIAA Paper 98-4211. Boston, 1998.
11. Борисов В.Г., Начинкина Г.Н., Шевченко А.М. Энергетический подход к управлению полетом // Автоматика и телемеханика. 1999. № 6. С. 59-70.
12. Шаров В.Д. Прогнозирование и предотвращение выкатываний самолета за пределы взлетно-посадочной полосы. Lambert Academic Publication, 2013. 115 с.
13. Завершинский В.В. Разработка концепции бортовой автоматизированной системы предупреждения для снижения риска выкатывания воздушных судов на пробеге. Автореф. дис. канд. техн. наук. Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации, 2011, 20 с.