

Шевченко А.М., Начинкина Г.Н, Проказина М.В.

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА ТРАЕКТОРИИ ТОРМОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

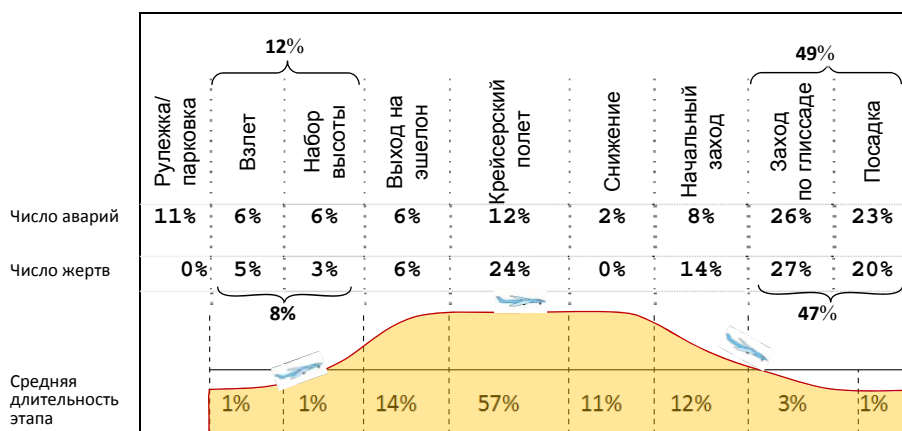
Введение

Вопросы улучшения ситуационной осведомленности по мере интенсификации воздушных перевозок и расширения границ допустимых условий эксплуатации воздушных судов вопросы безопасности полетов приобретают все большую остроту.

Фирмой Boeing ежегодно публикуется аналитический обзор авиационных происшествий (АП) в мировой авиации. Последний выпуск состоялся в 2016 г. [1]. Ниже в таблице 1 приведены обобщающие данные из этого обзора по распределению АП за период 2002-2015 гг. Как следует из анализа данных, на этапах взлета и посадки происходит более половины всех катастроф, а только на наземных участках (разбега и торможения) – 29% притом, что длительность этих участков составляет всего 2% от средней длительности полета.

Сравнение с ранее опубликованными данными показывает практически неизменное соотношение доли аварийных АП на количество вылетов и на час полета. Заметна лишь одна неблагоприятная тенденция – число катастрофически посадок из общего числа катастроф увеличилось с 25 до 49%, в том числе на финальной стадии пробега по взлетно-посадочной полосе (ВПП) с 12 до 23%. В том же источнике приведены данные по процентному распределению причин аварий. Хронологический анализ не выявил тенденции к снижению аварийности. Более того, анализ состояния отечественного парка самолетов показывает, что по мере совершенствования техники доля авиационных происшествий, связанных с недостатками систем самолетов и их характеристик, уменьшалась с 40% до 15%, а росла доля происшествий с 50% до 80%, обусловленных отклонениями в работе персонала, в основном экипажа.

Таблица 1. Процент аварийных ситуаций и число жертв на этапах полета. Данные за 2015 г.



Отмечается, что серьезными предпосылками к ошибочным действиям экипажа являются недостаточность или отсутствие информации о полетной ситуации, что выражается понятием «ситуационная осведомленность». В наших более ранних работах были разработаны методы и алгоритмы прогнозирования движения ЛА по взлетно-посадочной полосе на режимах взлета и посадки. Однако использование этих прогнозных координат для принятия решения пилотом о продолжении или прекращении движения сильно зависит от степени доверия к результатам прогноза.

В данной работе поставлена задача и предложены методы снижения ошибок прогнозирования длины тормозного пути и тем самым повышения достоверности прогноза. Задача решена путем введения эффективной коррекции прогноза на всем протяжении тормозного пути.

2. Основы энергетического подхода

Методологической базой научных и прикладных результатов является энергетический подход к управлению движением летательного аппарата (ЛА) [2,3]. В основе указанного подхода лежит уравнение баланса энергий.

В форме приращений удельной энергии это уравнение представлено в виде:

$$\Delta H_E = \Delta H_E^{og} + \Delta H_E^D + \Delta H_E^w.$$

Единицей измерения удельной энергии является метр, поэтому она называется также энергетической высотой. Здесь ΔH_E – приращение энергетической высоты ЛА, ΔH_E^{og} – удельная работа двигателя, ΔH_E^D – затраты энергии на преодоление вредного лобового сопротивления, ΔH_E^w – работа ветра.

Однако, на режимах движения по взлетно-посадочной полосе (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 [4].

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

Новый член представлен в форме:

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

где $k_{\text{торм}}$ – обобщенный нормированный коэффициент торможения, равный отношению суммарной силы сопротивления со стороны шасси к весу самолета. Коэффициент торможения $k_{\text{торм}}$ является функцией измеренного коэффициента сцепления колес $k_{\text{сц}}$ и коэффициента эффективности тормозной системы k_T :

$$k_{\text{торм}} = f(k_{\text{сц}}, k_T).$$

3. Прогнозирование дистанции торможения

В нештатных 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 .

Процесс посадки схематично показан на рис. 1, где обозначено: $x(t)$ – текущее положение самолета на ВПП, $D_{\text{торм}}$ – длина тормозного пути, $X_{\text{торм}}$ – координата конечной точки, $L_{\text{резерв}}$ – резерв пробега до обреза ВПП.

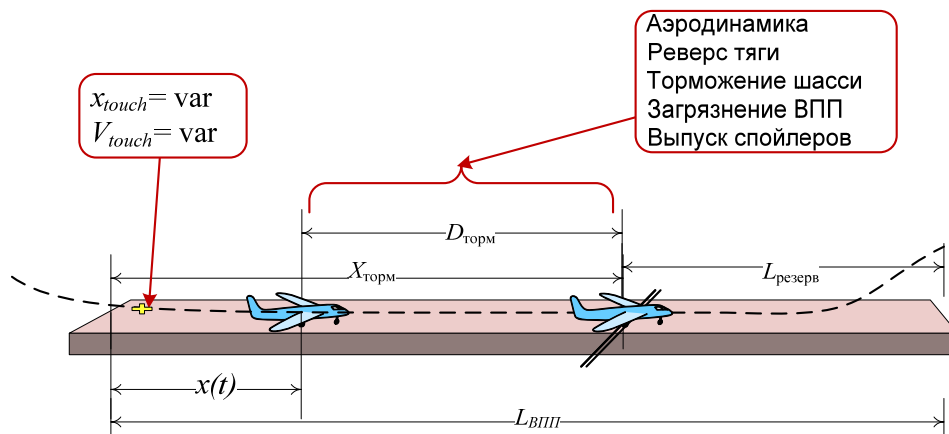


Рис. 1. Основные факторы процесса торможения

Прогнозируя этап торможения для самого общего случая, т.е. с этапа захода на посадку, будем учитывать высоту полета. Полная энергия движения на текущий момент равна

$$E(t) = 0,5 \cdot mV(t)^2 + mgh(t).$$

Прогнозное значение энергии в процессе движения по траектории длиной $S_{\text{прог}}$ изменяется под действием внешних сил:

$$E(t)_{\text{прог}} = 0,5 \cdot mV(t)^2 + mgh(t) + S_{\text{прог}} \sum_i F_i(t).$$

В число внешних сил F_i входят: тяга двигателя P (в том числе реверсивная), аэродинамические силы D , соответствующие текущей конфигурации, и силы торможения со стороны шасси $F_{\text{торм}}$. В настоящей методике предлагается вычислять сумму действующих сил через продольное ускорение $a(t)$:

$$\sum_i F_i = ma(t), \quad \text{при этом } a(t) = gn_x(t).$$

Критерием завершения процесса торможения может быть приближение скорости качения к какому-либо конечному значению, в частности, скорости рулежки. Задав критерий в форме $V(t) \leq \varepsilon$, где ε – малая или близкая к нулю величина, было получено выражение для текущей прогнозируемой длины тормозного пути:

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

По вычисленной оценке предельной дальности до конечной точки траектории самолета и доступности для измерения текущего положения самолета, в поле зрения пилота может быть сгенерировано сообщение о резерве дистанции безопасного торможения:

$$L(t)_{\text{резерв}} = L_{\text{ВПП}} - x(t) - D(t)_{\text{торм}}.$$

4. Коррекция алгоритма прогнозирования

В отличие от предыдущих [5,6], в настоящей работе принята новая концепция корректировки результатов прогнозирования дальности до наступления характерных событий при движении ЛА по ВПП. В модельных экспериментах была выявлена сильная зависимость точности прогноза от конфигурации используемых средств торможения. Поэтому было предложено коэффициент коррекции оптимизировать отдельно для каждой конфигурации средств торможения.

Было показано, что наибольшие погрешности прогноза возникают на участке реверсирования тяги двигателя и на участке пробега с выпущенными интерцепторами. Эти участки всегда идентифицируются в системе управления и поэтому переключение

вида коррекции не вызывает затруднений.

В модельных экспериментах было показано, что в начале тормозного пути (на реверсном участке) наибольшее влияние на ошибки прогнозирования имеют коэффициент торможения $k_{\text{торм}}$ и скорость качения V . Поскольку коэффициент торможения $k_{\text{торм}}$ в наибольшей степени зависит от коэффициента сцепления $k_{\text{сц}}$, который и сообщается на борт для расчета посадки или перед разбегом, то коэффициент коррекции на участке с максимальным реверсированием тяги $Q_{\text{рев}}$ в явном виде учитывал именно эти факторы:

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

Методом регрессионного анализа результатов модельных испытаний на режимах торможения во всевозможных погодных условиях принята более точная аналитическая аппроксимация коэффициента коррекции на реверсном участке

$$k_{\text{рев}}(k_{\text{сц}}) = -131,59(k_{\text{сц}})^4 + 292,47(k_{\text{сц}})^3 - 233,41(k_{\text{сц}})^2 + 77,34k_{\text{сц}} - 7,462.$$

Эмпирическая зависимость 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 путем поиска на множестве полетных условий по критерию минимума средней погрешности прогноза на реверсном участке. На участке пробега с выпущенными интерцепторами коррекция достигалась простым масштабированием оптимальных коэффициентов по массе, нормированной средней посадочной массой $m_{\text{норм}} = GS/GS_{\text{сред}}$. После уборки интерцепторов коэффициент коррекции снова менял масштаб. В итоге была сформирована следующая логическая структура корректирующих цепей в алгоритме прогнозирования (рис. 2).

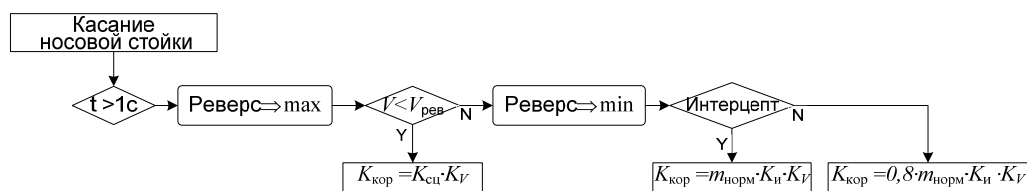


Рис. 2. Логика настройки коэффициента

Предметом дальнейших исследований должны быть вопросы программной реализации базы данных для оптимальных коэффициентов коррекции. Предстоит сделать выбор между интерполяцией табличных функций и аппроксимацией их аналитическими функциями.

В перспективе реализация метода прогнозирования на борту повысит ситуативную

осведомленность экипажа и облегчит принятие решений в критических ситуациях.

Библиографический список

1. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959 – 2011. July 2012. <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>.

2. 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.

3. Павлов Б.В., Шевченко А.М., Начинкина Г.Н. Энергетический подход в проектировании систем управления полетом. // «Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем». Казань, КГТУ. Вып. 2 (16), том 8, 2003. С. 24-43

4. A. Kuznetsov, A. Shevchenko, Ju. Solonnikov. The Methods of Forecasting Some Events During the Aircraft Takeoff and Landing //19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace (ACA2013). Germany. 2013.

5. А. М. Шевченко. Разработка и исследование метода прогнозирования дистанции пробега самолета на посадке //«Мехатроника, автоматизация, управление». 2015, Т. 16, №12, с. 841-847.

6. А.М. Шевченко, Г.Н Начинкина, М.В. Проказина. Прогнозирование траектории торможения летательного аппарата на взлетно-посадочной полосе // Труды XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2016 г., С. 104-109