

УДК 629.73.02; 681.5.01

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ УЩЕРБА ПРИ АВАРИЙНОМ ТОРМОЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

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, прогнозирование дальности, торможение, выкатывание.

Аннотация: излагается метод прогнозирования траектории воздушного судна на режиме послепосадочного торможения. Метод основан на энергетическом подходе к управлению полетом. Ошибки прогнозирования дальности до точки останова могут приводить к выкатыванию воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы с нанесением повреждений. Предложен метод оценивания вероятного ущерба при выкатывании. Результаты статистических испытаний демонстрируют малые ошибки прогнозирования.

1. Введение

В связи с интенсификацией воздушных перевозок и расширением эксплуатационных диапазонов воздушных судов (ВС) вопросы безопасности авиационной техники становятся все более острыми. Особое внимание уделяется безопасности операций на взлетно-посадочной полосе. Статистика авиационных происшествий (АП) по материалам последних зарубежных и отечественных исследований показывает, что доля АП, обусловленных участием человека в процессе выполнения полетного задания колеблется от 50 до 70% [1–4]. Такая высокая доля негативных происшествий обусловлена повышенной психологической нагрузкой и дефицитом времени на принятие решений. В [5] сделан анализ причин и факторов возникновения ситуаций с выкатыванием ВС за пределы взлетно-посадочной полосы (ВПП). В [6] исследованы статистические характеристики режимов торможения на аэродромах Канады по оригинальной методике. В наших предыдущих работах [7–9] были предложены энергетические методы прогнозирования будущего развития ситуации на взлетно-посадочных режимах полетного задания. На основании таких прогнозов могут быть сформированы информационные сооб-

щения и оповещения в поле зрения пилота. Однако для исключения ложных сообщений методы прогнозирования должны обладать не только высокой точностью, но и высокой достоверностью или надежностью результатов.

В настоящей работе исследовались прогностические свойства разработанных алгоритмов прогнозирования тормозного пути с точки зрения точности и достоверности результатов прогнозирования по отношению к реальным событиям.

2. Основы метода прогнозирования тормозного пути ВС

Методологической базой наших методов прогнозирования событий на взлетно-посадочных режимах движения воздушного судна является энергетический подход к управлению полетом [10-11]. Основной прогнозируемой величиной в процессе торможения является длина тормозного пути $D_{\text{торм}}$ от текущего положения самолета на ВПП до точки, в которой скорость качения $V(t)$ будет погашена до малой конечной скорости.

Выбрав критерий конечного состояния $V(t) \leq \varepsilon$, где ε – близкая к нулю малая величина, было получено выражение для прогнозной длины тормозного пути [7]:

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

Здесь $n_x(t)$ - продольная измеряемая перегрузка.

Для компенсации изменяющихся условий на пробеге и конфигурации средств торможения были предложены алгоритмы коррекции прогнозных значений.

По вычисленной оценке предельной дальности останова самолета, в поле зрения пилота, в том числе на динамическом индикаторе торможения, может быть сгенерировано оповещение о резерве дистанции безопасного торможения

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

Такое сообщение будет облегчать принятие пилотом решения об экстренном торможении

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

3. Оценка уровней ущерба от ошибочных прогнозов

С позиции общего подхода к анализу вариантов развития опасных событий на объектах повышенного риска, приведенного в [12], в рамках вероятностной модели полет может быть представлен в виде реализации одного из возможных сценариев.

Абсолютно успешное выполнение этапа торможения с нулевым ущербом - это процесс перехода ВС из состояния начального торможения в конечное состояние останова (или достижения скорости руления) I_0 в пределах ВПП. Под влиянием факторов опасности (ФО) сценарий торможения отклоняется от нормативной траектории, в результате может наступить любое из множества q возможных нештатных событий (исходов полета) I_j .

Упрощенно представим, что каждый исход I_j описывается только двумя параметрами: вероятностью P_j его наступления и величиной предполагаемого (гипотетического) ущерба S_j . В ситуациях с выкатыванием за порог ВПП величина ущерба наиболее сильно коррелирована со скоростью, при которой произошло выкатывание. Это же утверждается и другими авторами [13] Ввиду недостаточной статистики по характеру повреждений в результате выкатывания и тем более в стоимостном выражении таких

АП, будем считать размер ущерба (в некотором приближении) пропорциональным скорости выкатывания V_{or} .

$$(1) \quad S_j \cong S(V_{or}^j) = \eta V_{or}^j$$

Все исходы полета образуют полную группу событий:

$$\sum_{j=1}^q P(I_j) + P(I_0) = 1.$$

Произведение вероятности каждого исхода торможения на ущерб может рассматриваться как риск, связанный с этим исходом (событием):

$$(2) \quad \tilde{R}_j = P_j S_j$$

Сумма произведений (2) представляет собой среднее случайной величины ущерба \tilde{R} , которое и является одной из возможных характеристик суммарного риска режима торможения:

$$\tilde{R} = \sum_{j=1}^q P_j S_j,$$

Если предположить бесконечно большое число исходов полета, то приходим к непрерывной случайной интегральной величине ущерба, для которой риск считается как математическое ожидание $M(S)$:

$$R = M(S) = \int_{-\infty}^{+\infty} S f(S) dS,$$

где $f(S)$ – плотность распределения вероятностей ущерба. Или при нашем допущении (1) принимаем выражение $f(S)$ через плотность распределения вероятностей скорости в виде:

$$f(S) \cong f(\eta, V_{or})$$

Статистические характеристики вероятной скорости выкатывания определим следующим образом. Каждая траектория торможения заканчивается конечным участком, на котором скорость качения монотонно уменьшается до нуля. Вид этой зависимости определяется коэффициентом сцепления колес с покрытием ВПП, массой ВС и силами торможения, развиваемыми всеми средствами торможения. Поскольку на конечном участке аэродинамические силы невелики, реверс тяги выключен, то динамика торможения зависит только от степени обжатия тормозной системы колес. В ситуациях приближения к торцу ВПП для предотвращения выкатывания естественным образом всегда используется одна и та же максимальная степень обжатия. Это позволяет зависимость скорости искать в виде $V=V(m, \mu, D_{fin})$, где μ – коэффициент сцепления шасси с покрытием ВПП, D_{fin} – дальность до финальной точки, т.е. до останова.

В работе была поставлена задача найти метод расчета и анализа статистических свойства вероятных скоростей выкатывания, обусловленных ошибками прогнозирования точки останова ВС в процессе торможения в области эксплуатационных режимов торможения. Эта область ограничена начальными скоростями торможения, допустимыми посадочными массами и приемлемыми для эксплуатации ВС состояниями покрытия ВПП. Состояние покрытия на каждой ВПП непрерывно мониторится аэродромными службами и условно характеризуется измеренным коэффициентом сцепления μ .

Как отмечалось выше, величина ущерба или уровень риска при выполнении финального этапа торможения, ориентируясь на прогноз, имеет явную корреляцию со скоростью выкатывания V_{or} (overgun speed). Эта скорость непосредственно зависит от расстояния в момент пересечения границы ВПП до прогнозной точки останова. Это расстояние является ошибкой прогнозирования. Таким образом, $V_{or}=f(\Delta D_{\text{торм}})$. Вид функции $f(\Delta D_{\text{торм}})$ определяется только динамикой торможения на конечном участке траектории, где выключен реверс, убраны интерцепторы, отсутствует аквапланирование, и поэтому хорошо детерминирован и консервативен по отношению ко всем предыдущим эволюциям траектории. Эта динамика для каждой j -ой конфигурации кон-

кретного ВС определяется по записям модельных полетов. Путем обработки результатов детерминированного моделирования режимов торможения методом регрессионного анализа в работе были найдены аналитические аппроксимации функции $V_{or}^j(\Delta D_{\text{торм}}) = f^j(\Delta D_{\text{торм}})$. Поиск выполнялся специальным программным модулем, имеющимся в составе стенда.

Монотонный характер замедления ВС наиболее рационально описывается полиномиальной зависимостью. В настройках модуля аппроксимации можно задавать степень полинома от 2-го до 4-го порядка.

С помощью этой функции статистические характеристики дальности гипотетического выкатывания конвертируются в соответствующие характеристики скорости. Вид функции и ее аппроксимация полиномом 3-й степени приведены ниже на рис. 1.

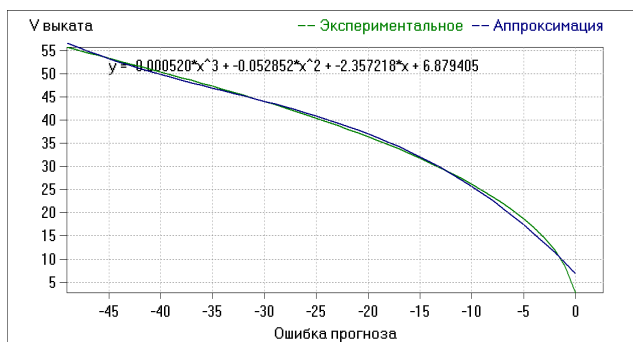


Рис. 1. Модельная скорость торможения и её аппроксимация

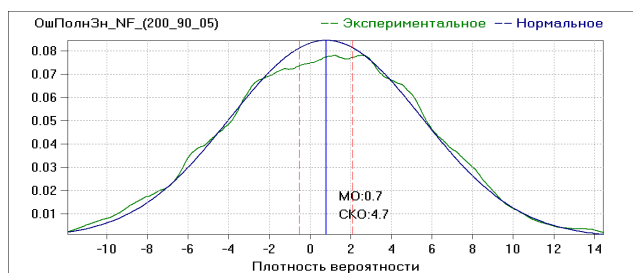


Рис. 2. Плотность вероятности ошибок прогнозирования дальности до останова в границах ВПП



Рис. 3. Гистограмма распределения вероятных скоростей выкатывания по пяти зонам

скоростей выкатывания (так называемым карманам) (рис. 3).

Программа статистического анализа формирует отчет непосредственно на экране стенда и создает текстовый файл отчета для распечатки документа. Фрагмент отчета с указанием границ («от» и «до») каждого интервала ошибок прогноза дальности, соответствующего ему скоростного интервала, количества ошибок и их вероятности в этом интервале показан ниже.

В среде эксплуатантов авиационной техники имеется статистика АП с описанием инцидентов с выкатыванием, включая записи всех координат процесса торможения и характер повреждений. По такой статистике может быть установлена относительная цена ущерба $\eta = \eta(V_{or}^j)$ в функции скорости V_{or}^j , при которой произошло выкатывание.

Для оценки серьезности последствий авиационных происшествий в ИКАО принята шкала из 5 уровней. Для наших целей будем использовать такую же шкалу градаций скорости выкатывания.

В качестве примера приводятся результаты статистического анализа модельных испытаний процесса торможения ВС (рис. 2, 3). Номинальные условия торможения: масса ВС $m = 105\text{т}$, $k_{\text{сц}} = 0,5$. Имитировались случайные отклонения массы и коэффициента сцепления от номинальных. Задавались вариации: $3\sigma_m = 5\%$, $3\sigma_{k_{\text{сц}}} = 10\%$. Число испытаний 1000.

На рисунках приведена графическая интерпретация результатов в виде графиков плотности вероятности ошибок прогнозирования (рис. 2) и гистограммы распределения числа ошибочных прогнозов по 5 группам


```

=====
Среднее значение ошибок прогноза точки останова -0.14368
Средне-квад. отклонение ошибок = 2.47688
Левые интервалы: - всего 450:
1 интервал от -8.83 до -6.74, скорость от 20.52 до 23.93 - количество 4 вероятность 0.004
2 интервал от -6.74 до -4.84, скорость от 17.11 до 20.52 - количество 42 вероятность 0.042
3 интервал от -4.84 до -3.10, скорость от 13.70 до 17.11 - количество 96 вероятность 0.096
4 интервал от -3.10 до -1.50, скорость от 10.29 до 13.70 - количество 131 вероятность 0.131
5 интервал от -1.50 до 0.00, скорость от 6.88 до 10.29 - количество 177 вероятность 0.177
=====

```

Приведенные данные показывают, что результаты прогнозирования содержат малые ошибки по отношению к реальному движению ВС, причем более вероятны прогнозируемые исходы с выкатыванием с малыми скоростями и, соответственно, с малым вероятным ущербом.

Список литературы

1. Rallo N. Runway safety: the big picture // ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, 6–8 November 2012.
2. Sharov V. Development of Overrun Prognosis System in Volga-Dnepr Airline.//ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, 6–8 November 2012.
3. Jarinov S. Role of the Regulator. // ICAO Regional Runway Safety Seminar (RRSS). Moscow, 6–8 November 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. pp. 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. pp. 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 Proceedings Volumes. 2013. 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. Boston, 1998. Paper 98–4211.
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.