

Проказина М.В., Шевченко А.М.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИИ ТОРМОЖЕНИЯ САМОЛЕТА

Введение

Ранее [1] были разработаны теоретические основы энергетического метода прогнозирования положения летательного аппарата на взлетно-посадочной полосе в процессе его движения на режиме торможения. В настоящей работе излагаются описание исследовательского стенда и результаты детерминированных и статистических испытаний предложенных алгоритмов прогнозирования.

Основными целями моделирования процесса торможения были:

- получение модельных прогнозных значений тормозного пути;
- демонстрация работоспособности алгоритма коррекции на множестве ситуаций;
- получение оценок погрешностей прогноза;
- выявление наиболее неблагоприятных внешних факторов.

Ключевые слова: энергетический подход, методы прогнозирования, режим торможения.

1. Моделирующий стенд для испытаний алгоритмов прогнозирования

Исследования алгоритмов прогнозирования проводились на компьютерном моделирующем стенде. В составе стенда содержалась полная сертифицированная модель самолета ТУ-204 со штатной системой управления, включая модель двигателя и модель шасси. Стенд оснащен сервисными средствами для задания условий эксперимента, обработки и регистрации результатов.

Фрагмент главного окна программы, показывающий возможности настроек, представлен на рисунке 1.

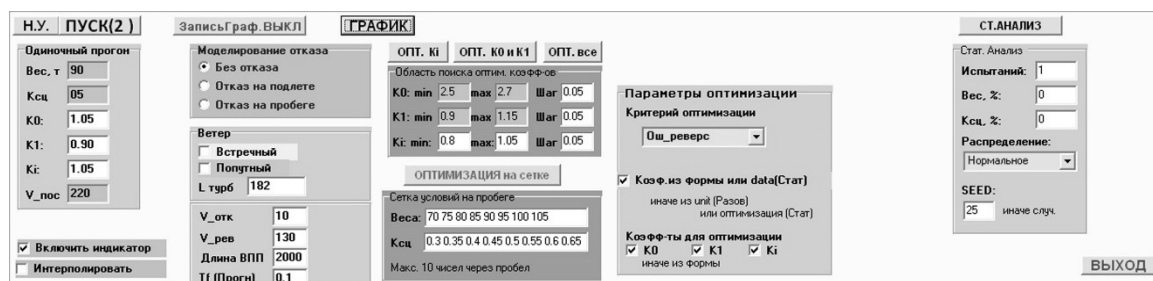


Рисунок 1 – Окно настроек условий моделирования.

Исследования проводятся последовательно в трех режимах:

- 1) *Одиночный полет.*

2) Поиск оптимальных коэффициентов для алгоритма прогнозирования.

3) Статистические испытания алгоритмов прогнозирования.

2. Методика испытаний алгоритмов прогнозирования

Ранее в [1,2] из множества возможных вариантов коррекции был выбран метод масштабирования по относительной скорости.

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 методом поиска на множестве полетных условий по критерию минимума средней погрешности прогноза.

Для подтверждения правдоподобия прогноза были проведены специальные исследования погрешностей прогнозирования траектории. Мерой правдоподобия прогноза была принята усредненная погрешность расчета текущей дистанции торможения по отношению к реальному движению самолета.

На рисунке 2 показан пример эффективности предложенного метода коррекции. Графики показывают прогноз дистанции торможения без коррекции и с коррекцией. Видно, что средняя арифметическая ошибка прогноза тормозного пути в начале процесса не превосходит 40 м, а на конечном участке находится в пределах 10 м.

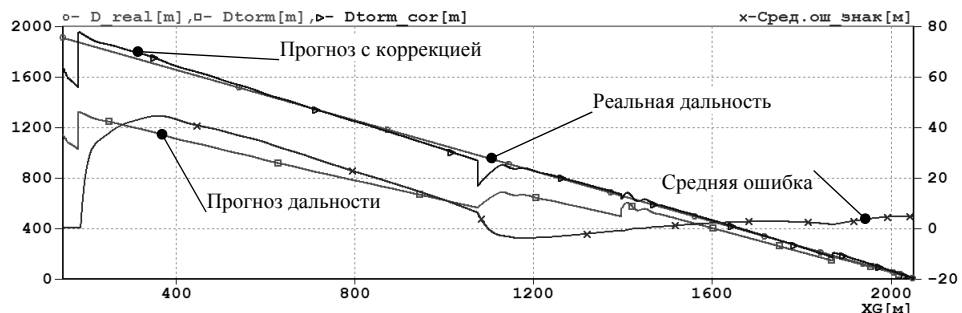


Рисунок 2 – Эффективность коррекции алгоритма прогнозирования.

3. Детерминированные испытания алгоритмов прогнозирования

Качество прогнозирования дистанции торможения в различных ситуациях предложенным энергетическим методом с коррекцией демонстрируется следующим рисунком 3.

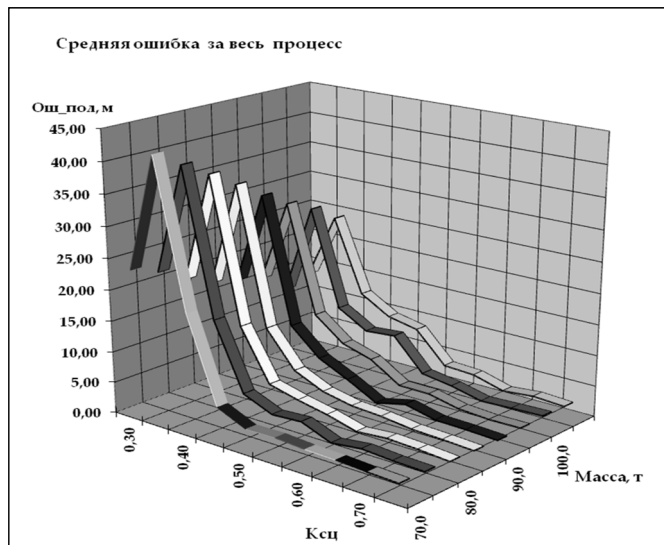


Рисунок 3 – Ошибки прогнозирования на множестве условий торможения

На нём показаны средние накопленные абсолютные ошибки за весь процесс торможения на множестве условий с различными массами в диапазоне от минимальной 70 т до максимальной 105 т и коэффициентами сцепления от 0,3 до 0,75. За исключением всплеска ошибок на режиме аквапланирования средние ошибки прогнозирования находятся в пределах 25 м, что по отношению к длине тормозного пути является достаточно хорошим

приближением. Малые ошибки в различных условиях свидетельствуют о хорошей адаптируемости структуры корректирующей цепи и о высоком качестве метода настроек оптимальных коэффициентов коррекции.

4. Статистические испытания алгоритмов прогнозирования

Существуют два фактора полета, которые не доступны для измерения непосредственно на траектории в каждый текущий момент – это масса самолета и обобщенный коэффициент торможения μ , который в свою очередь зависит от измеряемого аэродромными службами коэффициента сцепления $k_{сц}$.

Поэтому в реальном полете они являются случайными величинами. Авторами исследовались две альтернативные гипотезы относительно характера случайностей: с нормальным и с равномерным законом распределения. Моделировались случайные вариации посадочной массы и коэффициента сцепления в диапазоне $\pm 10\%$ от номинальных.

Были выполнены моделирования режимов торможения для нескольких типовых условий на пробеге. В каждой серии модельных испытаний выполнялось 1000 пробегов. В каждом процессе регистрировались следующие ошибки прогноза: на участке с максимальным реверсом тяги, на участке с выпущенными интерцепторами, среднее значение модуля ошибки за весь полет, среднее значение арифметической ошибки за полет.

В таблице 1 приведены погрешности прогнозирования дистанции торможения с оптимальными коэффициентами коррекции алгоритма. В таблице даны 4 вида оценок по

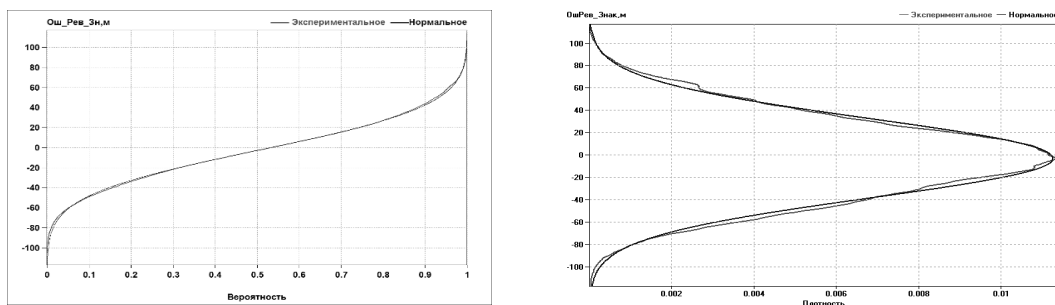
участкам траектории. Для сравнения даны результаты при нормальном и равномерном законах распределения случайных масс и коэффициента сцепления. Кроме того, исследования доказывают, что распределения погрешностей достаточно хорошо аппроксимируются именно нормальным законом.

Таблица 1 – Ошибки прогноза дальности на разных участках траектории

Скорость (км/ч)	Нормальное распределение				Равномерное распределение			
	Реверс.	Интерцепт	За весь путь(абс.)	За весь путь(арифм.)	Реверс.	Интерцепт	За весь путь(абс.)	За весь путь(арифм.)
240	51,24	27,30	55,86	-2,50	121,00	34,28	125,18	-11,98
220	69,88	22,09	69,34	-8,05	117,55	38,43	118,91	-11,20
200	64,96	25,06	64,22	-6,15	112,61	44,65	113,84	-8,18
180	51,51	26,10	51,54	-3,49	96,03	49,54	97,41	-6,16

Отметим, что оптимизация коэффициентов коррекции производилась по наиболее строгому критерию – по абсолютной величине отклонения прогноза от реальной траектории. В данном анализе весьма малые (в пределах 10 м) средние арифметические погрешности являются лишь количественной оценкой высокой степени достоверности прогноза.

На рисунке 4 для примера показаны экспериментальные функции распределения и соответствующие им плотности вероятности ошибок прогнозирования дистанции торможения ($\Delta D_{\text{торм}}$) самолета массой 90 т от начальной скорости 200 км/ч. На каждом графике нанесена аналитическая аппроксимация функции распределения нормальным законом.



$$K_{\text{сц}}=0,5 \text{ м } (\Delta D_{\text{торм}})=-2,92, \sigma(\Delta D_{\text{торм}})=35,4$$

Рисунок 4 – Функции распределения и плотности вероятности ошибок прогнозирования дистанции торможения самолета

Были также проведены исследования чувствительности (робастности) настроек коэффициентов коррекции от каждого из двух случайных факторов.

При вариациях массы в пределах 10% от номинальной ошибки прогноза за весь этап торможения практически не менялись. Среднее значение модуля ошибки за весь пробег $M(|\Delta D_{\text{торм}}|) = 6,43 \text{ м}$, а $CKO(|\Delta D_{\text{торм}}|) = 2,27 \text{ м}$.

Затем был выполнен аналогичный анализ, но при вариациях коэффициента сцепления и фиксированной массе. В этом эксперименте было зарегистрировано $M(|\Delta D_{\text{торм}}|) = 118,11 \text{ м}$ и $CKO(|\Delta D_{\text{торм}}|) = 84,47 \text{ м}$. Эти данные свидетельствуют о том, что оптимальные настройки алгоритма коррекции остаются приемлемыми в широком диапазоне отклонений масс, но весьма критичны к заданию коэффициента сцепления.

Заключение

Разработан компьютерный исследовательский стенд для испытания алгоритмов прогнозирования. Стенд содержит сертифицированную модель самолета ТУ-204, пакет программ расчета прогнозных величин и их статистической обработки, а также средства регистрации результатов испытаний.

Были выполнены детерминированные и статистические модельные испытания алгоритмов в широком диапазоне условий торможения, включая экстремальные. Выявлены неустойчивые режимы торможения. За их исключением суммарные погрешности прогноза на всей дистанции торможения находятся в пределах 24 м. В результате проведенных исследований создана база данных по оптимальным настройкам алгоритма прогнозирования тормозного пути во всем диапазоне условий на пробеге, включая посадочные массы, скорости и коэффициенты сцепления.

Проведенные статистические испытания алгоритмов прогнозирования показали их высокую достоверность и правдоподобие.

Полученные результаты продемонстрировали возможность и целесообразность более раннего информирования экипажа о приближении к критическим состояниям. Вопросы, касающиеся формы и способов представления аудиовизуальных сообщений экипажу на борту, имеют важнейшее значение, входят в компетенцию специалистов по эргономике и летчиков-испытателей и поэтому оставлены за рамками данной работы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 15-08-02943 А.

Библиографический список

1. Шевченко А.М., Начинкина Г.Н., Проказина М.В. Метод прогнозирования траектории торможения летательного аппарата // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сборник трудов XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть I. Самара, 15-17 июня 2016 г. – Самара, Изд-во СНЦ РАН, 2017.
2. Шевченко А.М., Начинкина Г.Н. Энергетический метод прогнозирования безопасного торможения самолета // «Проблемы управления» № 4, 2014, С.38-44.