

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

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИИ ТОРМОЖЕНИЯ

Для исследования усовершенствованных алгоритмов прогнозирования [1,2] были расширены функции разработанного ранее моделирующего стенда. На стенде реализована полная модель современного лайнера ТУ-204. Стенд имеет набор режимов, позволяющих провести синтез скорректированных алгоритмов прогнозирования и их испытания. Стенд оснащен развитыми сервисными средствами для задания условий тестирования, обработки и регистрации результатов. По мере расширения круга решаемых задач стенд оснащается новыми функциями.

Фрагмент главного окна стенда в современной конфигурации, показывающий возможности настроек, представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Главное окно настроек режимов моделирования

На режимах моделирования имеется возможность имитировать отказ двигателя, включить ветровые возмущения, исследовать взлетные или посадочные аэродинамические конфигурации, исследовать влияние нештатного отключения или принудительного продолжения реверса тяги в ситуациях экстренного торможения. Модель алгоритмов прогнозирования содержит базу настроек алгоритма на дискретном множестве условий торможения.

Поскольку состояния устройств торможения и действия внешних факторов меняются с высокой скоростью, то для сглаживания возможных высокочастотных всплесков все вычисленные прогнозные значения проходят через демпфирующий фильтр.

На этапах стендовой отработки и настройки параметров системы прогнозирования имеется возможность выбирать постоянную времени фильтра в соответствующем окне переменных.

В состав сервисного программного обеспечения исследовательского стенда был включен программный модуль для анализа результатов статистических испытаний разрабатываемых алгоритмов прогнозирования. Модуль статистических испытаний был настроен на анализ погрешностей прогнозирования точки останова в процессе торможения самолета на ВПП.

По результатам испытаний создается итоговый документ, в котором перечисляются условия тестирования и регистрируются все основные показатели всех координат процесса торможения в каждом пуске. Фрагмент сводной таблицы результатов статистических испытаний представлен ниже (табл. 1)

Таблица 1. Статистические испытания

№	Ксц	Масса	К0opt	К1opt	К1opt	ОшРев	ОшРев.Зн	ОшИнт	ОшПолн	ОшП.Зн
М(*)	0,500	89,77	0,85	0,95	1,15	12,67	12,24	5,65	10,72	0,81
СКО(*)	0,000	2,57	0,00	0,00	0,00	1,85	1,25	4,42	0,77	2,37
МАХ(ОшРев) 44	0,500	96,18	0,85	0,95	1,15	18,21	11,29	11,59	12,40	5,15
МІN(ОшРев) 7	0,500	84,36	0,85	0,95	1,15	8,75	8,75	16,77	12,54	-4,83

По сравнению с ранее полученными результатами [3] видно значительное уменьшение среднего арифметического и дисперсии ошибок. Этот эффект объясняется использованием улучшенных алгоритмов прогнозирования.

В программе анализа результатов статистических испытаний предусмотрена возможность построения графиков функции распределения и плотности вероятности.

Поскольку процесс торможения является одним из самых динамичных и напряженных этапов полета, то повышение достоверности прогноза на участке реверсирования имеет большое значение. Это обусловлено тем, что на этом участке скорость движения наиболее высока, что приводит пилота в состояние повышенного психологического напряжения. Информационная поддержка в форме точных оценок развития ситуации на участке реверсирования будет весьма полезна для принятия решения пилотом в условиях дефицита времени.

В табл. 2 показаны ошибки прогнозирования при оптимизации настроек алгоритмов по критерию минимума ошибок на реверсном участке – по  $\min(\text{Ош.рев})$  и по минимуму ошибок за весь полет –  $\min(\text{Ош.полн})$ .

Первый критерий обеспечивает весьма малые ошибки и поэтому дальнейшие оценки качества прогнозирования выполнялись в варианте настроек, оптимизированных

по критерию минимума ошибок на реверсном участке.

Таблица 2. Ошибки прогноза на участке реверса и за весь тормозной путь

Коэффициент сцепления	0,3		0,5		0,75	
	Ош.рев.	Ош.полн	Ош.рев	Ош.полн	Ош.рев	Ош.полн
min(Ош.рев)	-8,97	-8,94	-0,48	10,27	-0,23	6,03
min(Ош.полн)	-21,35	-3,81	-3,54	-2,0	1,55	0,55

В настоящем исследовании ставилась задача оценить количество неточных или ошибочных прогнозов, находящихся в пределах допуска на отклонение от истинного значения параметра. Величина этого допуска может устанавливаться в окне настроек. Ошибки могут быть как отрицательными, так и положительными. Применительно к режиму торможения самолета они приобретают качественные различия и интерпретируются как пессимистические или оптимистические. Так, в случае экстренного торможения при прерванном взлете прогнозная переоценка тормозного пути может привести к ошибочному прекращению взлета, а его недооценка – к выкатыванию за пределы ВПП. В первом случае это приведет к отмене или перенесению рейса и выплате штрафов, а во втором возможны поломка шасси, разрушение фюзеляжа, разрушение двигателей, их возгорание и др.

В табл. 3 показаны зависимости количества прогнозов дальностей до точки останова, попадающих в допуск, от ширины этого допуска. Зависимости получены по результатам статмоделирования режима торможения самолета с начальной скоростью 220 км/ч, массой 90 т и коэффициенте торможения 0,5. Рассеяния исходных случайных масс самолета и коэффициента сцепления были приняты заведомо завышенными и составляли 10% по каждому. Число модельных посадок было 10000.

Таблица 3. Количества ошибочных прогнозов точки останова

Допуск на ошибку прогноза, %	1	2	3	4	5
Ошибки слева	286	608	920	1223	1538
Ошибки справа	267	505	712	912	1110
Различие	19	103	208	311	428

Данные в таблице 3 показывают несимметричное распределение ошибок прогноза, что хорошо видно по разнице ошибок справа и слева. При этом пессимистических ошибок больше. Такой характер распределения в пределах любого допуска с большей вероятностью будет допускать более затратные последствия от ошибочных принятых решений.

В таблице 4 приведены количества ошибочных прогнозов дальностей до точки останова, попадающих в допуск 5% для разных масс самолета и в доверительный интервал с уровнем доверия 95%. Разброс входных случайных параметров составил 5%.

Таблица 4. Количества ошибочных прогнозов дальностей до точки останова

Масса, <i>m</i>	Ошибок в 5%-допуске		Доверительный интервал (P=0,95) Границы, <i>m</i>	
	Слева	Справа	Слева	Справа
70	62	66	48,42	50,94
90	59	66	63,46	66,19
105	48	53	65,67	68,27

Обращает на себя внимание малая величина доверительного интервала шириной порядка 3 м. Это означает, что в этом интервале с вероятностью 95% находится истинное среднее значение дальности до точки останова.

Для оценки серьезности последствий авиационных происшествий в ИКАО принята шкала из 5 уровней. Сервисные средства стенда дают возможность получать распределения ошибок заниженных (т.е. опасных) прогнозов по 5 интервалам. На рис. 2 представлено результаты анализа 1000 тормозных режимов самолета массой 90 т на загрязненной ВПП с коэффициентом торможения 0,5. На гистограмме показаны количества ошибок, попадающих в каждый из 5 интервалов скоростей.



Рис. 2. Результаты анализа 1000 тормозных режимов самолёта массой 90 т

Из рис. 2 видно, что в интервалы с большими скоростями качения попадает наименьшее количество ошибочных прогнозов.

### Библиографический список

1. А.М. Шевченко, Г.Н Начинкина, М.В. Проказина. Метод повышения достоверности прогноза траектории торможения летательного аппарата. // Сборник трудов XX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть I. Самара, 14-16 июня 2017 г. – Самара, АНО «Изд-во СНЦ», 2018. – С. 84.
2. А. М. Шевченко. Разработка и исследование метода прогнозирования дистанции пробега самолета на посадке. // «Мехатроника, автоматизация, управление». 2015, Т. 16, № 12, С. 841-847.
3. М.В. Проказина, А.М. Шевченко. Исследования алгоритма прогнозирования дистанции торможения самолета // Труды XIX Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2016 г., С. 60-64