



УДК 629.7

К. Б. Амелин, О. И. Саута,
Ю. Г. Шатраков, С. В. Бабуров

Математическая модель ошибок радиотехнических корабельных систем для исследования проблем автоматической посадки

Приведены результаты статистической обработки зарегистрированных на борту летательных аппаратов отклонений от заданной траектории при выполнении заходов на посадку на авианесущий корабль при использовании радиолокационной системы сантиметрового диапазона радиоволн и микроволновой радиомаячной системы посадки. Проведен анализ и выполнено осреднение результатов статистической обработки. Построена математическая модель случайной (шумовой) составляющей ошибки измерений радиотехнических систем посадки, используемых на авианесущих кораблях. Предложена математическая модель, основанная на реальных данных натурных испытаний, которая позволяет проводить исследования широкого спектра по определению точностных характеристик выполнения захода на посадку на корабль различного типа, в том числе при наличии качки корабля и пространственных эволюций летательного аппарата. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: летательный аппарат, корабль, система посадки, статистическая обработка ошибок.

Введение

Эффективность морской авиации в значительной степени зависит от характеристик инструментальных систем корабельной посадки. В настоящее время для обеспечения посадки летательных аппаратов (ЛА) на авианесущие корабли в России и за рубежом широко применяются посадочные радиолокационные комплексы (ПРЛК) и системы микроволновой посадки типа *MLS* [1, 2]. В отличие от распространенных наземных систем посадки метрового диапазона радиоволн типа *ILS* и систем дециметрового диапазона типа ПРМГ они обладают меньшими габаритами и более высокой точностью, что обеспечивает эффективность их использования для посадки ЛА на корабли.

Для разработчиков бортовых навигационно-посадочных комплексов ЛА морской авиации большой интерес представляет характер поведения ошибок сигналов наведения на разных участках глиссады захода на посадку в реальных условиях эксплуатации. Использование при разработке алгоритмов комплексной обработки информации для бортовых вычислительных устройств «паспортных» тактико-технических характеристик систем может привести к дополнительным ошибкам [3] и, как следствие, к снижению эффективности применения морской авиации.

Целями настоящей работы являются оценка и анализ статистических характеристик сиг-

налов наведения корабельных посадочных систем путем обработки зарегистрированных на борту ЛА цифровых значений этих сигналов для построения математических моделей и программных комплексов, предназначенных для проведения исследований характеристик систем автоматической посадки.

Исходные данные

Для оценки статистических характеристик сигналов наведения при посадке ЛА на авианесущий корабль в настоящей статье были использованы результаты натурных испытаний, полученные при отработке заходов на посадку двух ЛА, оснащенных бортовым оборудованием ПРЛК и *MLS*. Для исследования характеристик ошибок ПРЛК и *MLS* было отобрано 10 инструментальных заходов на посадку с удаления 8 км до торца посадочной палубы корабля. Заходы на посадку выполнялись по стандартной для корабельной посадки глиссаде с углом наклона 4° при использовании пилотами директорного режима управления.

Заходы на посадку на корабль выполнялись в дневное время в простых метеоусловиях при движении корабля со скоростью до 22 узлов и путевой скорости ЛА около 250 км/ч.

Полученные на борту ЛА значения сигналов отклонения от глиссады посадки использовались в системах пилотажно-навигационного комплекса для выдачи информации в систему автоматического управления (САУ) и регистрировались в специализированном бортовом накопителе с частотой 3 Гц.

© Амелин К. Б., Саута О. И., Шатраков Ю. Г.,
Бабуров С. В., 2017



Методика обработки результатов испытаний

При проведении испытаний отсутствовали эталонные средства и внешние траекторные измерения от более точных систем, поэтому статистическая обработка была направлена на оценивание высокочастотных составляющих погрешностей сигналов наведения, т. е. на оценивание шумовой составляющей следования по траектории *PFN* [2]. При этом с учетом достаточно большой инерционности ЛА для исключения систематических ошибок измерений и реального смещения ЛА от заданной траектории было принято решение о проведении аппроксимации зарегистрированных измерений полиномом 3-го порядка на относительно небольших интервалах времени (дальностей). Такой метод традиционно используется в технологиях обработки летных испытаний [4]. При этом спектральные характеристики погрешностей систем посадки исследованы не были, так как регистрация данных проводилась с частотой 3 Гц при реальном темпе обновления информации от посадочных систем 13...20 Гц.

Статистическая обработка зарегистрированных данных от систем ПРЛК и *MLS* осуществлялась с помощью программ *MATLAB* и *Excel*. При этом массивы измерений, зарегистрированные в течение каждого захода на посадку, разбивались на участки, которые аппроксимировались полиномом 3-го порядка с

коэффициентами, рассчитанными по методу наименьших квадратов. Аппроксимирующий полином был принят за математическое ожидание, между которым и исходными данными формировались разности. Затем на интервалах дальностей протяженностью 0,5 км осуществлялось вычисление средней квадратической ошибки (СКО) измерений. Полученные значения СКО усреднялись для всех заходов на посадку с использованием той или иной системы (ПРЛК или *MLS*) и строились графические зависимости величины соответствующей погрешности высокочастотной составляющей сигнала наведения от дальности ЛА до расчетной точки посадки (РТП).

В дальнейшем, для полученных оценок погрешностей будем использовать обозначения:

S_1 – погрешность ПРЛК по каналу курса;

S_2 – погрешность ПРЛК по каналу глиссады;

S_3 – погрешность *MLS* по каналу курса;

S_4 – погрешность *MLS* по каналу глиссады.

Приведенные ниже оценки погрешностей S_i представляют собой удвоенное значение рассчитанных СКО, что практически соответствует вероятности 0,95.

Результаты статистической обработки

На рис. 1 представлены погрешности S_i сигналов наведения (с вероятностью 0,95) в зависимости от дальности ЛА до РТП при выполнении заходов на посадку на корабль при ис-

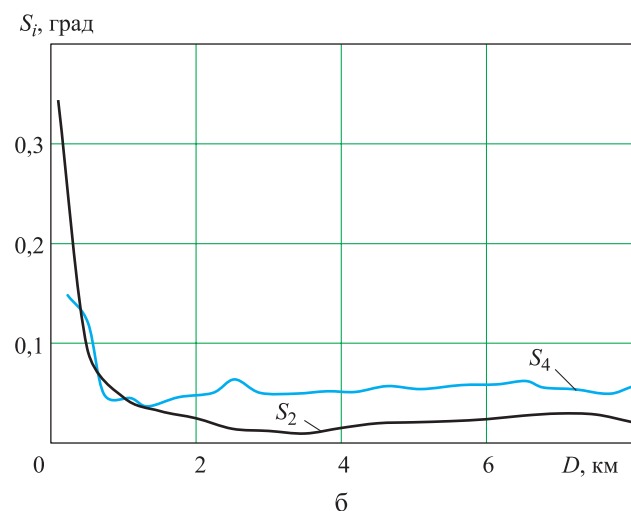
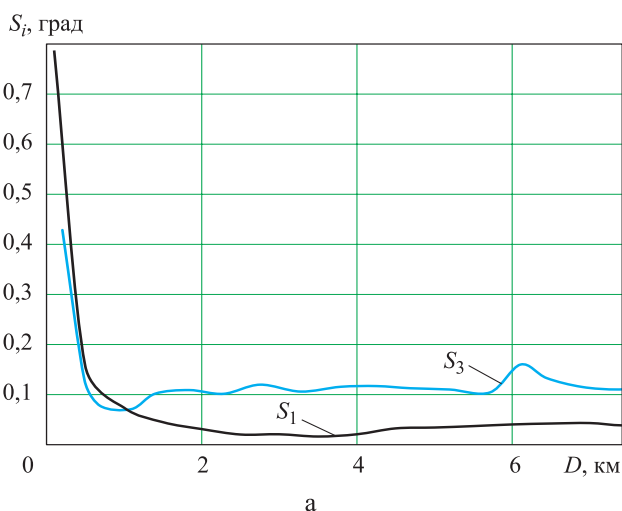


Рис. 1. Погрешности сигналов наведения для систем ПРЛК и *MLS* в зависимости от дальности ЛА до расчетной точки посадки:

а – канал курса; б – канал глиссады



пользовании сигналов наведения от ПРЛК и *MLS*, полученные в результате обработки данных по описанной выше методике. В приведенных данных частично учтены результаты, полученные ранее [5].

Из представленных на рис. 1 результатов статистической обработки сигналов наведения, зарегистрированных в процессе выполнения заходов на посадку, следует:

1) погрешности сигналов наведения по курсу S_1 и глиссаде S_2 для системы ПРЛК на удалении более 2 км от РТП практически не изменяются, а при приближении к РТП сначала плавно (до 1 км), а затем резко (в 6–9 раз) возрастают;

2) погрешности сигналов наведения по курсу S_3 и глиссаде S_4 для системы *MLS* на удалении более 1 км от РТП практически не изменяются, при приближении к РТП – резко (в 3–5 раз) возрастают;

3) погрешности сигналов наведения по курсу и глиссаде для системы ПРЛК в 3–4 раза меньше, чем для системы *MLS* на удалении более 2 км от РТП, на удалении от РТП около 1 км погрешности обеих систем практически равны;

4) при заходе на посадку с использованием ПРЛК на удалении от РТП более 2 км высокочастотные составляющие погрешности сигналов наведения по курсу S_1 и глиссаде S_2 практически составляют около $0,03^\circ$ и $0,02^\circ$ соответственно;

5) при заходе на посадку с использованием *MLS* на удалении от РТП более 1 км высокочастотные составляющие погрешности сигналов наведения по курсу S_3 и глиссаде S_4 практически составляют около $0,11^\circ$ и $0,06^\circ$ соответственно.

Анализ результатов статистической обработки

Характер поведения СКО погрешностей сигналов наведения систем ПРЛК и *MLS*, представленных на рис. 1, может быть объяснен следующим образом.

При использовании для формирования сигналов наведения первичных радиолокаторов сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн существует проблема возникновения дополнительной ошибки определения отклонений ЛА от заданной глиссады сниже-

ния, обусловленная геометрическими размерами ЛА [1]. Если при нахождении ЛА на относительно больших удалениях от радиолокатора эта погрешность определяется в основном величиной эффективной площади рассеяния ЛА и мощностью излучения радиолокатора, то при приближении ЛА к точке установки антенны радиолокатора существенное значение имеют множественные переотражения от элементов фюзеляжа и оперения ЛА. Когда угловой размер области отражения радиосигналов становится соизмерим или превышает значения заданных для радиолокатора допустимых угловых погрешностей измерения, то эта погрешность может превышать заданные требования.

Место установки радиолокатора определяется техническими возможностями его размещения на корабле. В случае выполнения захода на посадку ЛА всегда приближается к точке установки радиолокатора, его геометрические размеры могут оказывать существенное влияние на погрешность измерения. Проблеме снижения погрешности измерения угловых отклонений в системах ПРЛК можно решить, установив на ЛА уголкового отражатели или используя принципы вторичной радиолокации [1, 6]. Особую важность рассматриваемая проблема приобретает для радиолокационных систем посадки, применяемых для беспилотных ЛА при посадке в автоматическом режиме [7].

При использовании для формирования сигналов наведения в радиомаячных системах посадки типа *MLS*, как отмечено выше, погрешность высокочастотной составляющей сигналов наведения возрастает при приближении ЛА к РТП. Подобный эффект наблюдается во многих радиомаячных системах [8] при приближении ЛА к радиомаякам. Он обусловлен взаимодействием диаграмм направленности бортовой антенны и радионавигационного поля, сформированного антенной системой радиомаяка при быстром изменении уровня сигнала на входе бортового приемника. Это приводит к дополнительным ошибкам в работе систем слежения радиотехнических трактов бортового приемника.

Математическая модель ошибок

При разработке алгоритмов комплексной обработки информации для бортовых навига-



ционно-посадочных комплексов особый интерес представляет модель ошибок сигналов наведения на разных участках траектории глиссады в зависимости от дальности до РТП. Использование такой модели позволяет разрабатывать оптимальные алгоритмы, существенно повышающие эффективность формирования сигналов управления, в том числе для САУ ЛА. Представленные на рис. 1 результаты статистической обработки позволяют предложить следующие модели для высокочастотных составляющих ошибок *PFN* сигналов наведения корабельных систем посадки типа ПРЛК и *MLS*.

Для систем ПРЛК и *MLS* в качестве математической модели высокочастотных составляющих ошибок измерений при выполнении заходов на посадку на корабль можно принять следующие зависимости:

$$S_i = \begin{cases} k_i, & \text{при } D > 1 \text{ км;} \\ k_i + f_i(D), & \text{при } D \leq 1 \text{ км.} \end{cases}$$

Здесь S_i – соответствующие ошибки измерений (при $i = 1$ по курсу для ПРЛК, при $i = 2$ по глиссаде для ПРЛК, при $i = 3$ по курсу для *MLS*, при $i = 4$ по глиссаде для *MLS*);

k_i – параметры, являющиеся константами, принимающие значения: $k_1 = 0,03...0,05^\circ$; $k_2 = 0,02...0,03^\circ$; $k_3 = 0,10...0,13^\circ$; $k_4 = 0,04...0,06^\circ$;

$f_i(D)$ – линейно убывающая от дальности функция.

При этом $f_i(D) = 0$ на $D = 1$ км; максимальное значение $f_i(D)$ при $D = 0$ км (в РТП), определяется типом посадочной системы и каналом измерения: $f_1(0) = 0,79^\circ$, $f_2(0) = 0,35^\circ$; $f_3(0) = 0,45^\circ$; $f_4(0) = 0,15^\circ$.

Использование для коэффициента k_i диапазона значений обусловлено недостаточным объемом статистического материала, требуется его дальнейшее уточнение путем увеличения объема исходных данных.

Моделирование ошибок корабельных систем посадки

Предложенная выше модель ошибок была использована при разработке и отладке алгоритмов формирования информации в бортовых навигационно-посадочных комплексах ЛА для исследования характеристик систем по-

садки на авианесущие корабли при наличии качки и пространственных эволюций ЛА.

Для примера, на рис. 2 приведены результаты цифрового моделирования ошибок, возникающих в курсовом (рис. 2, а) и глиссадном (рис. 2, б) каналах радиолокационной системы инструментальной посадки, при наличии пространственных эволюций ЛА и качки корабля по продольной, боковой и вертикальной осям с характеристиками, представленными на рис. 2, в, г и д соответственно.

Моделирование было проведено в среде *MATLAB*. Качка корабля имитирована с использованием уравнений регулярной качки [9].

По результатам анализа данных, полученных при моделировании в программном комплексе, можно заключить, что формируемые значения ошибок измерений сигналов наведения инструментальных систем посадки в целом соответствуют результатам, полученным в натуральных испытаниях. Однако с удаления от 2 до 1 км принятая модель погрешностей будет более оптимистичной, чем результаты, полученные на основе статистической обработки результатов испытаний.

Заключение

Выполнена оценка статистических характеристик сигналов наведения при выполнении инструментальных заходов на посадку с использованием радиолокационных (ПРЛК) и радиомаячных (*MLS*) систем посадки. Экспериментально полученные зависимости оценок погрешности определения сигналов наведения по курсу и глиссаде от расчетной точки посадки могут быть достаточно точно аппроксимированы относительно простыми математическими выражениями. На основе результатов статистической обработки данных натуральных испытаний построена математическая модель, формирующая ошибки измерений радиотехнических систем посадки, используемых на авианесущих кораблях. Эта модель также учитывает реальные характеристики и параметры качки корабля и пространственных эволюций летательных аппаратов.

Выполненное моделирование заходов летательных аппаратов на посадку и полученные при этом погрешности сигналов наведения в целом показывают адекватность формируемых

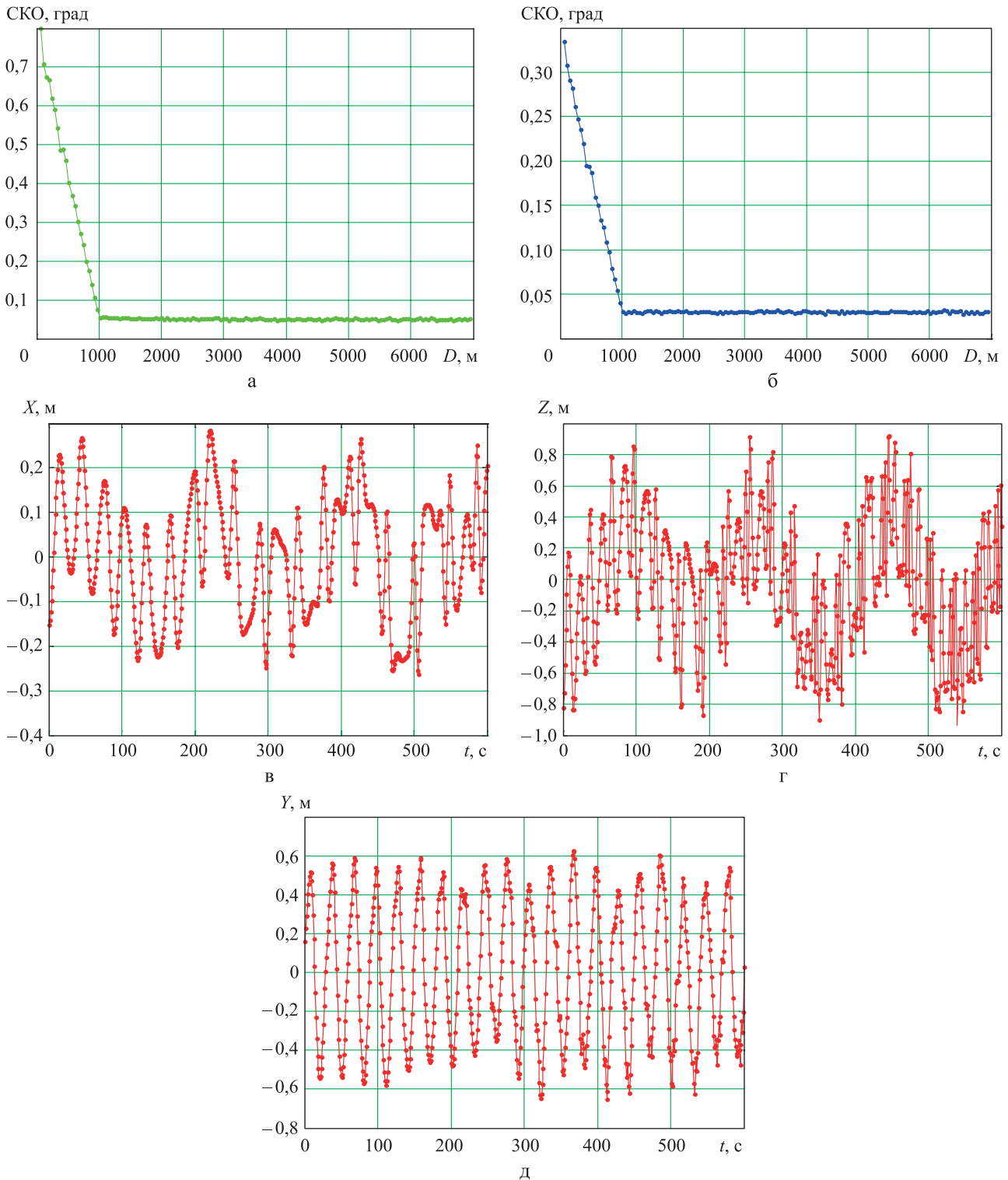


Рис. 2. Результаты цифрового моделирования ошибок, возникающих в курсовом и глиссадном каналах радиолокационной системы инструментальной посадки

в программном комплексе ошибок сигналов наведения имеющимся данным натурных испытаний. Разработанный программный комплекс целесообразно использовать при проведении исследований характеристик систем автоматической посадки летательных аппара-

тов на авианесущие корабли. Также целесообразно провести сравнение теоретических расчетов с полученными данными для уточнения и корректировки предложенной математической модели и выполнить моделирование заходов на посадку при различных параметрах



качки корабля и эволюций ЛА. Для повышения достоверности оценок погрешностей определения сигналов наведения необходимо увеличить объем исходных данных.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант № 16-07-00030-а).

Список литературы

1. Справочник по радиолокации: в 4 т. Т. 1. Основы радиолокации / под общ. ред. К. Н. Трофимова. М.: Сов. Радио, 1976. 456 с.
2. Авиационная электросвязь. Т. 1. Радионавигационные средства. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Канада, Монреаль: ИКАО, 2006. 612 с.
3. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 345 с.
4. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: МАИ-Принт, 2012. 360 с.
5. Амелин К. Б., Саута О. И. Инструментальные погрешности радиолокационных систем посад-

- ки // Авионика: сб. науч. ст. по матер. I Всерос. научн.-производ. конф. (17–18 марта 2016 г.). Воронеж, ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. С. 13–16.
6. Кузнецов А. А., Дубровский В. И., Уланов А. С. Эксплуатация средств управления воздушным движением. М.: Транспорт, 1983. 256 с.
 7. Антохина Ю. А., Бабуров С. В., Бестугин А. Р., Переломов В. Н., Саута О. И. Развитие навигационных технологий для повышения безопасности полетов // под науч. ред. Ю. Г. Шатракова. Минобразования и науки Российской Федерации. СПб.: ГУ АП, 2016. 298 с.
 8. Саута О. И., Губкин С. В. Статистические характеристики азимутально-дальномерной информации РСБН при посадке ЛА // Вопросы радиоэлектроники. 1987. Сер. ОВР. Вып. 7. С. 23–29.
 9. Посадка беспилотных летательных аппаратов на суда: проблемы и решения / под общ. ред. С. Н. Шарова. СПб.: Судостроение, 2014. 192 с.

Поступила 13.12.17

Амелин Константин Борисович – инженер второй категории АО «Навигатор», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: бортовые навигационно-посадочные комплексы летательных аппаратов корабельного базирования.

Саута Олег Иванович – доктор технических наук, главный специалист АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: наземные и бортовые комплексы и системы навигации и посадки летательных аппаратов, системы обеспечения безопасности полетов.

Шатраков Юрий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки России, лауреат Государственных и Правительства Санкт-Петербурга премий, действительный член Академии технологических наук Российской Федерации, ученый секретарь АО «ВНИИРА», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: радиотехнические системы навигации, посадки и управления воздушным движением.

Бабуров Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора АО «Навигатор», г. Санкт-Петербург. Область научных интересов: перспективные системы авионики, системный анализ.

Mathematical model of radio engineering ship system errors in the autolandings problems studies

The paper describes the results of statistical processing of flight path errors recorded on board aircraft during aircraft carrier landing approaches using the S-band radar system and the microwave radio-beacon landing system. The analysis and statistical processing data averaging is carried out. A mathematical model of a random (noise) component of the measurement error of radio engineering landing systems used on aircraft carriers is built. The study introduces a mathematical model based on actual data of full-scale tests, which allows us to carry out a wide range of studies to determine the accuracy of various types aircraft landing approaches, including the presence of ship rocking and spatial evolution of the aircraft. The results of mathematical simulation are presented.

Keywords: aircraft, ship, landing system, statistical error handling.



Amelin Konstantin Borisovich – second rank engineer, Navigator Company, St. Petersburg.
Science research interests: on-board navigation and landing systems of ship-based aircraft.

Sauta Oleg Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Chief Specialist, Joint Stock Company “VNIIRA”, St. Petersburg.
Science research interests: ground and airborne complexes and systems of aircraft navigation and landing, safety control systems.

Shatrakov Yuriy Grigorievich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Honored Scientist of Russia, Laureate of State and Government of St. Petersburg prizes, full member of the Academy of Technological Sciences of the Russian Federation, academic secretary, Joint Stock Company “VNIIRA”, St. Petersburg.
Science research interests: radio engineering systems of navigation, landing and air traffic control.

Baburov Sergey Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy Director General, Navigator Company, St. Petersburg.
Science research interests: advanced avionics systems, system analysis.