

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-63-72

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА ПОЛЕТОВ ПО НОРМАМ RVSM, PBN, САТII и САТIII НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО КРИТЕРИЯ НИКУЛИНА

Л.О. МАРАСАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

Производство полетов с использованием норм сокращенного минимума вертикального эшелонирования (RVSM – Reduced Vertical Separation Minimum), производство полетов с использованием навигации, основанной на характеристиках (PBN – Performance-based Navigation), осуществление автоматических посадок по категориям САТII и САТIII стало общепринятой практикой в связи с соответствующими требованиями ИКАО. При этом эксплуатанты должны получать специальные эксплуатационные разрешения, благодаря чему сама задача определения возможности осуществления таких полетов стала эксплуатационной. Повышение требований к надежности оценок точностных характеристик качества производства полетов требует развития и совершенствования методов их оценки. Прежде всего требуется применение методов, основывающихся на более точных представлениях о моделях погрешностей с более корректными моделями плотности распределения вероятностей погрешностей, особенно в области больших редких погрешностей. В представленной статье решается одна из задач этого комплексного подхода оценки точностных характеристик – задача обработки полетной информации с целью определения оценок точностных характеристик пилотажно-навигационного комплекса (ПНК), так как решение этой задачи обеспечивает возможность получения интегральной оценки точностных характеристик на основе применения комбинированных методов.

Показано, что мощность критерия Никулина выше мощности критерия Пирсона практически в два раза, что исключает в ряде случаев принятие неправильных гипотез о виде гипотетической функции распределения. Использование критерия Никулина позволяет существенным образом повысить точность оценок характеристик качества производства полетов по нормам RVSM, PBN, САТII и САТIII за счет увеличения мощности критерия, существенно увеличивает правильность оценок точностных характеристик, получаемых при расшифровке полетной информации.

**Ключевые слова:** минимум вертикального эшелонирования; навигация, основанная на характеристиках; категории посадки ИКАО, категории посадки, точностные характеристики, критерий Никулина.

### ВВЕДЕНИЕ

Международная организация гражданской авиации ИКАО регламентирует необходимость выдачи эксплуатантам специальных эксплуатационных разрешений, таких как:

- 1) производство полетов с использованием норм сокращенного минимума вертикального эшелонирования (RVSM – Reduced Vertical Separation Minimum);
- 2) производство полетов с использованием навигации, основанной на характеристиках (PBN – Performance-based Navigation);
- 3) осуществление автоматических посадок по категориям САТII и САТIII ИКАО.

Это нашло отражение в ряде научных публикаций [1–6]. В работе автора [7] рассмотрены научно-практические аспекты производства полетов по нормам RVSM, PBN, САТII и САТIII. Повышение требований к надежности оценок точностных характеристик качества производства полетов по этим нормам требует развития и совершенствования методов их оценки. Прежде всего требуется применение методов, основывающихся на более точных представлениях о моделях погрешностей с более корректными моделями плотности распределения вероятностей погрешностей, особенно в области больших редких погрешностей.

Погрешность самолетовождения имеет две составляющие – погрешность навигации и погрешность управления. Погрешности навигации являются основными по величине, опреде-

ляются в основном инструментальными и методическими погрешностями навигационных систем. Погрешности управления определяются внешними возмущениями, действующими на воздушное судно (ВС), динамическими характеристиками ВС, системы управления и навигационных сигналов.

### КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОИЗВОДСТВА ПОЛЕТОВ

Необходимость обеспечения требований безопасности при высокой интенсивности воздушного движения приводит к необходимости непрерывного контроля точности, контроля нахождения ВС в заданной области. Поэтому необходима оценка динамической погрешности  $\Delta Z(t)$ , которая характеризуется разностью между истинным (требуемым)  $Z_3(t)$  и действительным  $Z(t)$  сигналами на выходе пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) в любой момент времени.

Оценка точности, с одной стороны, сводится к определению границ области или «трубки», внутри которых должно находиться ВС, с другой стороны, к оценке вероятности нахождения ВС в этой «трубке». Основными характеристиками динамической точности являются математическое ожидание  $M[\Delta Z(t)]$  и начальный момент второго порядка случайной ошибки  $M[\Delta Z^2(t)]$  или среднеквадратическое отклонение.

Одним из наиболее перспективных направлений при решении поставленной задачи является создание и применение комплексной методики оценки точностных характеристик, основанной на совместном использовании результатов расчета, моделирования и расшифровки полетных данных. Такая методика базируется на использовании избыточной информации и позволяет наиболее эффективно получить оценки точностных характеристик.

Эффективное решение может быть достигнуто только в результате разработки и применения комплексной методики оценки точностных характеристик ПНК, основывающейся на совместном использовании результатов расчета, моделирования, расшифровки полетных данных и широкого использования избыточной информации.

Основная проблема, возникающая при создании комплексной методики, – это разработка и применение корректных и эффективных моделей при расчете и моделировании.

Повышение эффективности использования информации, содержащейся в реализациях, обеспечивается за счет:

- использования избыточной информации;
- применения оптимальных алгоритмов оценивания;
- широкого применения методов статистической проверки гипотез;
- применения методов последовательного анализа.

Таким образом, в комплексной методике, на основе методов общей теории статистических решений и методов последовательного анализа, обеспечивается наилучшее использование измерений для получения оценок и проверки статистических гипотез и наилучшее использование оценок для организации последующих измерений.

Завершающий этап комплексной методики – использование всей информации, полученной на различных этапах различными методами для формирования наиболее точных и надежных оценок.

В представленной статье решается одна из задач этого комплексного подхода оценки точностных характеристик – задача обработки полетной информации с целью определения оценок точностных характеристик ПНК, т. к. решение этой задачи обеспечивает возможность получения интегральной оценки точностных характеристик на основе применения комбинированных методов.

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Усложнение и расширение задач самолетовождения, решаемых ПНК, существенно затруднило оценку перечисленных выше точностных характеристик. Затраты, связанные с получением этих оценок, возросли. Поэтому актуальна постановка задачи получения оценок точностных характеристик требуемого качества с минимальными затратами. На оценку точностных характеристик ПНК влияют следующие факторы:

- малый объем выборок из-за ограниченного объема полетной информации;
- недостаточность обеспечения эталонной информации по ряду параметров;
- практическая невозможность получения информации в предельных режимах из-за соображений безопасности;
- невозможность получения информации по некоторым показателям.

Решение поставленной задачи с учетом перечисленных факторов может быть достигнуто в результате повышения эффективности использования полетной информации, а также повышения эффективности методов их расчета.

Теоретическими основами этих исследований являются следующие компоненты:

- использование методов обработки регистрируемых параметров, извлекающих максимум информации об их характеристиках;
- использование методов проверки статистических гипотез;
- идентификация моделей сигналов и системы ВС-ПНК по результатам расшифровки полетной информации;
- оценка адекватности идентифицируемых моделей реальным объектам и сходимости результатов расчета моделирования с реальными зарегистрированными параметрами осуществленных полетов;
- использование в расчетных методах предельных моделей, позволяющих получить гарантированные значения оценок точностных характеристик;
- применение методов оптимального планирования использования ограниченной полетной информации, обеспечивающих наилучшие наблюдения оцениваемых погрешностей, получение максимальной информации в каждом конкретном полете и оптимальное управление получением исходной информации, позволяющим достигнуть необходимой точности и надежности оценивания при минимальной выборке.

Одним из наиболее перспективных направлений при решении поставленной задачи является создание и применение комплексной методики оценки точностных характеристик, основанной на совместном использовании результатов моделирования и зарегистрированных параметров конкретных полетов. Такая методика базируется на использовании избыточной информации и позволяет наиболее эффективно получить оценки точностных характеристик.

Выбор методов расчета и оценки точностных характеристик ПНК определяется следующими факторами:

- конкретной задачей, решаемой на каждом этапе полета;
- показателем точности, который необходимо оценить;
- типом модели погрешностей;
- объемом и качеством априорной информации.

При этом необходимо учесть два противоречивых требования: с одной стороны, следует использовать математические модели максимально близкие к реальным системам и процессам, с другой стороны, модели должны быть простыми, чтобы иметь эффективные алгоритмы расчета. Как уже было сказано, основным показателем точности самолетовождения при выполнении различных режимов является вероятность нахождения погрешностей системы ВС-ПНК в заданной области. В зависимости от этапа полета, от моделей процесса и системы ВС-ПНК методы оценки этой вероятности видоизменяются.

Так, для определения вероятности выхода системы ВС-ПНК в заданный район воздушного пространства или вероятности невыхода за границы заданного коридора полета в момент прохождения того или иного пункта маршрута для погрешностей, описываемых нормальными процессами, и для линейных систем достаточно применения корреляционной теории и вычисления одномерной плотности вероятности. На основании этой теории и разработаны в основном существующие методики оценки точностных характеристик, в частности, автоматического захода на посадку.

Так, например, оценивают точность вертикального эшелонирования. При этом в средней области распределение ошибок систем считают нормальным. В области редких больших погрешностей распределение ошибок отличается от нормального. В частности, для рассматриваемого случая приемлемыми аппроксимациями распределения редких больших ошибок системы ВС-ПНК считают экспоненциальное или двойное экспоненциальное распределение.

Исходным материалом для оценивания точностных характеристик ПНК является выборка случайной величины. Поэтому первые этапы обработки – это получение по выборке экспериментальной функции плотности распределения вероятностей. Этой информации достаточно, чтобы получить предварительные оценки статистических характеристик погрешностей, по которым имелись прямые эталонные измерения, и перейти для этих параметров к анализу типа распределения.

При оценке точностных характеристик ПНК по зарегистрированным параметрам полета приходится, как правило, иметь дело с выборками малого объема, поэтому построение доверительных интервалов должно являться обязательным этапом в оценке точностных характеристик. Этим обеспечивается как точечное, так и интервальное оценивание погрешностей ПНК.

Применение методов теории проверки статистических гипотез решает задачу проверки соответствия погрешностей ПНК заданным требованиям (по критериям сравнения с заданной величиной).

Оптимальное управление процессами оценки качества производства полетов обосновывается с помощью теории статистических решений и теории оценивания, когда из условия достижения заданного уровня доверительной вероятности оцениваемого параметра принимается решение об окончании или продолжении процесса оценки.

Типовой обобщенный алгоритм оценки точностных характеристик включает в себя последовательно следующие модули обработки экспериментальных данных для анализа одной реализации:

- проверка стационарности;
- оценка параметров распределения выборочным методом;
- определение вида предполагаемого распределения;
- интервальное оценивание параметров распределения;
- регрессионный, дисперсионный или корреляционный анализ реализации;
- идентификация моделей характеристик реализации;
- определение спектральной и корреляционной функций;
- определение плотности распределения выхода реализации за заданный уровень.

Для реализации вышеприведенного алгоритма необходимо рассматривать задачу разработки программно-математического обеспечения, способствующего оптимизации и повышению точности обработки экспериментальных данных.

Разработанные алгоритмы оценки вида функции распределения и ее параметров на основе критерия Никулина и проектируемое программно-математическое обеспечение (ПМО) должно обеспечивать получение основных оценок точностных характеристик процесса автоматического полета самолета в любом эксплуатационном режиме работы ПНК.

Также проектируемое ПМО должно обеспечивать получение основных оценок точностных характеристик процесса автоматического полета самолета в режимах «Стабилизация высо-

ты», «Навигация», «Заход на посадку» и «Посадка», а также давать рекомендации по применению семейства логнормальных законов распределения, определения вида распределения и расчет его характеристик.

Для определения вероятности выхода системы ВС-ПНК в заданный район воздушного пространства или вероятности невыхода за границы заданного коридора полета в момент прохождения того или иного пункта маршрута для погрешностей, описываемых нормальными процессами, и для линейных систем обычно достаточно применения корреляционной теории и вычисления функции распределения вероятности.

При этом для аппроксимации распределения ошибок систем применяется наиболее распространенный нормальный закон распределения. Но, как показала практика обработки выборок исследуемых параметров полета ВС, нормальное распределение применимо для 30–40 % параметров. Обычно используется критерий Хи-квадрат Пирсона.

Типовой обобщенный алгоритм оценки точностных характеристик включает в себя следующие модули обработки экспериментальных данных для анализа одной реализации:

- оценку параметров распределения выборочным методом;
- определение вида предполагаемого распределения;
- определение вероятности нахождения вектора параметров ВС в заданной области.

Проведенные исследования свойств статистики, предложенной Пирсоном (критерий Хи-квадрат), показали, что эта статистика обладает важными для практического применения достоинствами, главным из них является ее универсальность, так как с ее помощью можно проверять гипотезы о различных законах распределения.

Отметим попутно следующие бесспорные факты, которые должны учитываться при проведении статистического анализа точностных характеристик ВС. Во-первых, выбирая число интервалов в критериях Хи-квадрат, мы должны осознавать, что увеличение их числа не приводит к росту мощности критерия. Во-вторых, следует учитывать, что при проверке простых гипотез непараметрические критерии согласия уступают по мощности критериям типа Хи-квадрат, особенно если в последних применяется асимптотически оптимальное группирование.

### **ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ НИКУЛИНА К ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАХОДА ВС НА ПОСАДКУ**

Последние достижения в математической статистике показали, что традиционный критерий согласия о виде функций распределения Хи-квадрат для ряда случаев оценки параметров этих распределений некорректен. Работы математика Никулина избавили этот критерий от ошибок [8].

В работах автора подробно рассмотрены результаты исследований Никулина для нормального закона распределения параметров, на основе которых сформулирован модифицированный алгоритм критерия согласия и разработано программно-математическое обеспечение, которое избавлено от ошибочного решения принятия гипотезы о виде функции распределения на основе традиционного критерия Пирсона. В итоге рассмотренный модифицированный алгоритм согласия Никулина и программно-математическое обеспечение повышают мощность критерия, существенно увеличивают правильность оценок точностных характеристик, получаемых при расшифровке полетной информации.

Рассмотрим типовой пример расчета. Он может быть применен к решению любой из задач оценки точностных характеристик при производстве полетов с использованием норм сокращенного минимума вертикального эшелонирования (RVSM), производстве полетов с использованием навигации, основанной на характеристиках (PBN), а также при осуществлении автоматических посадок по категориям CATII и CATIII. Для исследования воспользуемся вы-

боркой типового параметра полета (отклонение вертикальной скорости на высоте 15 м при заходе на посадку).

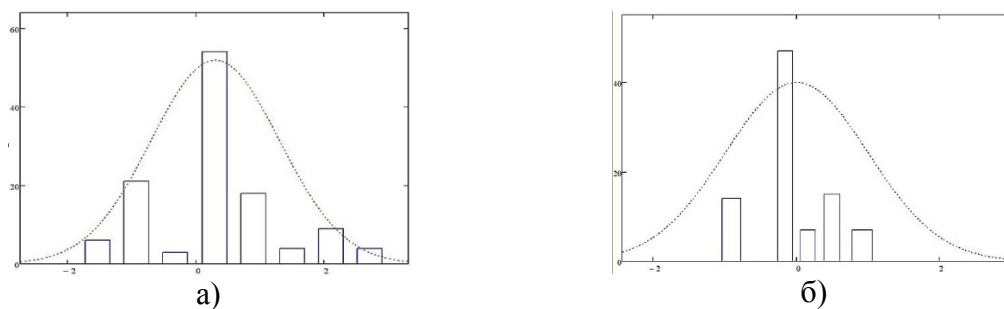
Сформируем вариационный ряд, расположив элементы выборки по возрастанию. Затем проведем нормирование. Определим количество интервалов разбиения исследуемой выборки, используя формулу Старджеса, и определим вид функции распределения по классической трактовке. Исходные данные сгруппированы в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

Группирование исходных данных  
Grouping the source data

$k$		1	2	3	4	5	6
3	$y_i$	-0,4307					
	$\varepsilon_i$	3,0000	0				
	$\omega_i$	0,3764	-0,7527				
4	$y_i$	-0,6745	0				
	$\varepsilon_i$	3,4040	0,8694				
	$\omega_i$	0,7623	-0,7623				
5	$y_i$	-0,8416	-0,2533				
	$\varepsilon_i$	4,3607	1,6570	0			
	$\omega_i$	1,1424	-0,6678	-0,9491			
6	$y_i$	-0,9674	-0,4307	0			
	$\varepsilon_i$	5,2793	2,4035	0,7468			
	$\omega_i$	1,5139	-0,5330	-0,9809			
7	$y_i$	-1,0676	-0,5659	0,1800			
	$\varepsilon_i$	6,1636	3,1211	1,4375	0		
	$\omega_i$	1,8766	0,3780	-0,9481	-1,1009		
8	$y_i$	-1,1503	-0,6745	-0,3186	0		
	$\varepsilon_i$	7,0243	3,8191	2,0958	0,6738		
	$\omega_i$	2,2307	-0,2116	-0,8809	-1,1382		
9	$y_i$	-1,2206	-0,7647	-0,4307	-0,1397		
	$\varepsilon_i$	7,8590	4,4983	2,7303	1,3058	0	
	$\omega_i$	2,5769	-0,0385	-0,7927	-1,1305	-1,2377	
10	$y_i$	-1,2816	-0,8416	-0,5244	-0,2523	0	
	$\varepsilon_i$	8,6722	5,1620	3,3469	1,9099	0,6226	
	$\omega_i$	2,9158	0,1389	-0,6909	-1,0949	-1,2689	
...	$y_i$	-1,3352	-0,9085	-0,6046	-0,3488	-0,1142	
...	...	...	...	...	...	...	.....

Для проведения теста по критерию Хи-квадрат выберем интервалы равной длины. Полученная гистограмма приведена на рис. 1, а.



**Рис. 1.** Гистограмма теста:  
а – по критерию Пирсона; б – по критерию Никулина  
**Fig. 1.** Histogram of the test:  
a – according to Pearson's criterion; b – according to Nikulin's criterion

Определим теоретические частоты попадания в соответствующие интервалы

$$p_i = \Phi\left(\frac{y_{i+1} - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{y_i - m}{\sigma}\right). \quad (1)$$

Задавшем уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  определим число степеней свободы. По известным таблицам определяем критическое значение статистики Хи-квадрат, которое равно  $\chi_{кр}^2 = 11,07$ .

Далее рассчитаем статистику Хи-квадрат для исследуемой выборки по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i} = 0,49. \quad (2)$$

Так как  $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ , то делаем заключение, что гипотеза о соответствии исследуемой выборки нормальному закону распределения может быть принята.

Теперь проведем аналогичную процедуру с тем же примером, но уже используя критерий Никулина.

Для проведения теста по критерию Никулина разобьем исследуемую выборку на определенное количество равновероятностных интервалов, как это показано на рис. 1, б. Вероятность попадания в каждый интервал в этом случае одинакова.

Определим значения параметров критерия Хи-квадрат по табл. 1. Значение статистик  $U^2$  определяем по формуле

$$U^2 = \sum_{i=1}^{k+1} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k+1} (\varepsilon_i v_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k+1} (\omega_i v_i)^2. \quad (3)$$

Вычисленное значение  $U^2 = 12,99$ .

Критическое значение статистики  $U^2$  определяется аналогично критическому значению статистики Хи-квадрат.

Сравнивая полученные значения, заключаем, что гипотеза о соответствии исследуемой выборки нормальному закону распределения критерием Никулина отвергается.

Правильность принятия альтернативной гипотезы подтверждается и оценками мощности критериев. Мощность критерия представляет собой значение  $1 - \beta$ , где  $\beta$  – вероятность ошибки 2-го рода. Очевидно, что чем выше мощность используемого критерия при заданном значении

$\alpha$ , тем лучше он различает гипотезы  $H_0$  и  $H_1$ . Особенно важно, чтобы используемый критерий хорошо различал близкие альтернативы. Графически требование максимальной мощности критерия означает, что плотности  $g(s|H_0)$  и  $g(s|H_1)$  должны быть максимально «раздвинуты».

$S_\alpha$  – порог принятия решения, определяемый по уровню значимости  $\alpha$ .

Тогда, если функция распределения нулевой ( $H_0$ ) гипотезы Хи-квадрат имеет вид

$$g(s) = \frac{1}{2^{\frac{r}{2}} \Gamma\left(\frac{r}{2}\right)} S^{2-1} e^{-\frac{s}{2}}, \quad (4)$$

где  $r$  – число степеней свободы,

$\Gamma(\dots)$  – гамма-функция;

а смещение альтернативной гипотезы  $H_1$  задается формулой

$$\nu = N \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^1(\theta_1) - P_i(\theta_1))^2}{P_i(\theta_1)}, \quad (5)$$

то путем вычисления интеграла от функции распределения альтернативной гипотезы  $H_1$  в пределах от  $S_\alpha$  до  $(+\infty)$  получим искомое значение мощности критерия

$$\beta = \int_{S_\alpha}^{+\infty} g(s, \nu). \quad (6)$$

Для исследуемой нами выборки мощность получилась равной  $\beta = 0,654$  для критерия Хи-квадрат Пирсона и  $\beta = 0,976$  для критерия Никулина.

## ВЫВОДЫ

Из проведенных исследований, подкрепленных приведенным примером, можно сделать следующие выводы:

– при любой сложной нулевой гипотезе  $H_0$  и при определении оценок параметров распределения методом максимума правдоподобия статистика  $Y^2$  при справедливой гипотезе  $H_0$

имеет в качестве предельного – точное распределение  $\chi_{k-1}^2$ ;

– мощность критерия Никулина выше мощности критерия Хи-квадрат практически в два раза, что исключает в ряде случаев принятие неправильных гипотез о виде гипотетической функции распределения;

– использование критерия Никулина позволяет существенным образом повысить точность оценок характеристик качества производства полетов по нормам RVSM, PBN, CATII и CATIII за счет увеличения мощности критерия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравцов В.В. Оценка общего риска катастроф воздушных судов при внедрении RVSM в Российской Федерации и регионе Евразия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 174. С. 84–90.



2. Лебедев Б.В., Соломенцев В.В., Стратиенко А.Н. Исследование метода контроля вертикального эшелонирования воздушных судов на основе использования АЗН-В // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213 (3). С. 135–140.
3. Кушельман В.Я., Стулов А.В. Реализация концепции PBN ИКАО в гражданской авиации России // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 7 (318). С. 74–80.
4. Зелинский В.К., Потапова Е.Е., Ройзензон А.Л. Проблемы и решения при построении схем по процедурам PBN в Российской Федерации // Научный Вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 9 (319). С. 98–105.
5. Автоматическое управление посадкой самолета Ил-96-300 по категории IIIА / И.Ю. Касьянов, А.Г. Кузнецов, В.Н. Мазур, Е.А. Мельникова // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2010. № 1. С. 56–67.
6. Новые методы измерения малых рисков в задачах оценки соответствия требованиям к безопасности систем автоматической посадки самолетов / Л.Н. Александровская, А.Е. Ардалионова, В.Г. Борисов, В.Н. Мазур, С.В. Хлгтян // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2013. № 6. С. 68–83.
7. Кузнецов С.В., Марасанов Л.О., Перегудов Г.Е. Научно-практические аспекты производства полетов с использованием RVSM, PBN, CATII и CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS и EFB // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 01. С. 177–185.
8. Никулин М.С. Критерий Хи-квадрат для непрерывных распределений с параметрами сдвига и масштаба // Теория вероятностей и ее применение. 1973. Т. 18, № 3. С. 583–591.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Марасанов Леонид Олегович**, старший преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, l.marasanov@mstuca.aero.

### EVALUATION OF FLIGHT QUALITY BY RVSM, PBN, CATII, CATIII STANDARDS BASED ON NIKULIN MODIFIED CRITERION

**Leonid O. Marasanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Flight operations with the use of standards Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM); Performance-based Navigation (PBN); auto landings on CATII CATIII ICAO categories have become common practices in relation to the relevant requirements of ICAO. In this case, operators should receive special operational permits, due to that the task of determining the feasibility of such operations became operational. Increasing the reliability requirements to estimate the accuracy characteristics quality of flight operations requires the development and improvement of methods for their evaluation. First of all, the application of methods based on more accurate representations of error models with more correct models of the error probability density distribution is required, especially in the field of large, rare errors. This article solves one of the tasks of this complex approach to estimate the accuracy characteristics – the task of processing flight information in order to determine the estimates of the accuracy characteristics of the flight-navigation complex (FNC), since the problem solving provides the possibility of obtaining an integral estimate of the accuracy characteristics based on the application of combined methods.

It is shown that the power of the Nikulin criterion is almost twice as high as the Pearson power criterion, which in some cases excludes the acceptance of incorrect hypotheses about the form of the hypothetical distribution function. The use of Nikulin criterion makes it possible to significantly improve the assessments accuracy of flight quality performance characteristics according to RVSM, PBN, CATII and CATIII standards by increasing the criterion power. It significantly increases the estimates accuracy of the accuracy characteristics obtained during the deciphering of flight information.

**Key words:** Reduced Vertical Separation Minimum, Performance-based Navigation, ICAO Landing Category, landing categories, accuracy characteristics, Nikulin criterion.

## REFERENCES

1. **Kravtsov V.V.** *Otsenka obshchego riska katastrof vozdukhnykh sudov pri vnedrenii RVSM v rossiyskoy federatsii i regione Yevraziya* [Overall risk assessment for implementation of RVSM in the Russian Federation and Eurasia Region]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2011, no. 174, pp. 84–90. (in Russian)
2. **Lebedev B.V., Solomentchev V.V., Stratienco A.N.** *Issledovaniye metoda kontrolya vertikal'nogo eshelonirovaniya vozdukhnykh sudov na osnove ispol'zovaniya AZN-V* [Analysis method of vertical separation of aircraft control on the base of ADS-B]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2015, no. 213 (3), pp. 135–140. (in Russian)
3. **Kushelman V.Ya., Stulov A.V.** *Realizatsiya kontseptsii PBN ICAO v grazhdanskoy aviatsii Rossii* [The implementation of the concept ICAO PBN in the Russian Civil Aviation]. *Nauchnyy Vestnik GosNII GA* [Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation], 2015, no. 7 (318), pp. 74–80. (in Russian)
4. **Zelinskiy V.K., Potapova E.E., Royzenzon A.L.** *Problemy i resheniya pri postroyenii skhem po protseduram PBN v Rossiyskoy Federatsii* [PBN procedure design in the Russian Federation: problems and solutions]. *Nauchnyy Vestnik GosNII GA* [Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation], 2015, no. 9 (318), pp. 74–80. (in Russian)
5. **Kasianov I.Yu., Kuznetsov A.G., Mazur V.N., Melnikova E.A.** *Avtomaticheskoye upravleniye posadkoy samoleta Il-96-300 po kategorii IIIA* [Il-96-300 aircraft Cat. IIIA landing automatic control]. *Nauchnyy Vestnik MIEA* [Scientific Bulletin of the Moscow Institute of Electromechanics and Automatics], 2010, Vol. 1, pp. 56–67. (in Russian)
6. **Aleksandrovskaya L.N., Ardalionova A.E., Borisov V.G., Mazur V.N., Khlgatian S.V.** *Novyye metody izmereniya malykh riskov v zadachakh otsenki sootvetstviya trebovaniyam k bezopasnosti sistem avtomaticheskoy posadki samoletov* [New methods of small risks measurement in conformity evaluation problems for the automatic landing safety requirements]. *Nauchnyy Vestnik MIEA* [Scientific Bulletin of the Moscow Institute of Electromechanics and Automatics], 2013, no. 6, pp. 68–83. (in Russian)
7. **Kuznetsov S.V., Marasanov L.O., Peregudov G.Ye.** *Nauchno-prakticheskiye aspekty proizvodstva poletov s ispol'zovaniyem RVSM, PBN, CATII i CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS i EFB* [Scientific and practical aspects of flight operations with RVSM, PBN, CATII, CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS, EFB]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. [Scientific Bulletin of the MSTUCA], 2017, Vol. 20, № 01, pp. 177–185.
8. **Nikulin M.S.** *Kriteriy Khi-kvadrat dlya nepreryvnykh raspredeleniy s parametrami sdviga i masshtaba* [Chi-square test for continuous distributions with shift and scale parameters]. *Teoriya veroyatnostey i yeye primeneniye* [Probability theory and its application], 1973, Vol. 18, № 3, pp. 583–591. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Leonid O. Marasanov**, Senior Lecturer, Aircraft Electrical Systems and Avionics Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, l.marasanov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 21.09.2017  
Принята в печать 23.11.2017

Received 21.09.2017  
Accepted for publication 23.11.2017