

Гуленко В.Д., Грищенко Ю. В., Грибов В.М. Моделирование и оценка визуальной потери направления угла крена летными экипажами по модульным распределениям параметров полета // Кибернетика и вычислительная техника: Межведомственный сборник научных трудов. – К.: Вид. дім "Академперіодика" НАН України, 2010. – Вып. 160. – С. 43-56.

УДК 629.735.017.

В.Д. Гуленко, Ю.В.Грищенко, В.М. Грибов

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВИЗУАЛЬНОЙ ПОТЕРИ
НАПРАВЛЕНИЯ УГЛА КРЕНА ЛЕТНЫМИ ЭКИПАЖАМИ
ПО МОДУЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТА**

Данная статья посвящена актуальной проблеме повышения безопасности полётов по человеческому фактору. Рассмотрены вопросы возможности возникновения авиационных происшествий при определении пространственного положения воздушного судна. На основе анализа случайных величин сделан ряд важных выводов. Полученный метод модульных преобразований получил практическое применение в одном из лётных отрядов.

Введение

В настоящее время ИКАО придает очень большое внимание снижению аварийности на воздушных судах (ВС) за счет внедрения новых подходов к решению проблем по безопасности полетов и человеческому фактору. Примером этого являются такие документы ИКАО как Руководство по управлению безопасностью полётов (РУБП) – 2006, где предлагается при решении проблемы безопасности полетов создавать различные типы Систем управления безопасностью полетов (СУБП), а также «Глобальная дорожная карта безопасности полетов» - генеральная программа ИКАО в области БП на всех уровнях от авиакомпании до региональных отраслей [1].

Современный этап развития техники и технологии характеризуется тенденцией к обеспечению бездефектного производства и безопасной эксплуатации [2]. Данная тенденция воплощена в методологии менеджмента качества «Шесть сигма», допускающей лишь единичные дефекты и сбои в миллионе изделиях или услугах, а также при вероятностном анализе безопасности потенциально опасной для потребителя продукции, когда риски составляют порядка $10^{-6} \div 10^{-8}$.

Анализ существующих подходов. Учет маловероятных рисков, маловероятных аварийных и катастрофических ситуаций требуют рассмотрения существующих подходов к анализу сверхмалых вероятностей.

Рассмотрим особенности применения существующих методов анализа сверхмалых вероятностей к системам управления ВС, а также моменты появления «хвостовых эффектов». Наибольшее количество статистических выводов основано на допущении о нормальности исследуемого распределения. Широкое применение нормального распределения вероятностей основано на центральной предельной теореме, согласно которой случайная величина, обусловленная действием большого количества случайных факторов, среди которых нет доминирующего, может быть описана нормальным законом распределения вероятностей.

Кроме того, нормальное распределение является «наихудшим» (в смысле максимума неопределенности – энтропии) для случайных величин, определенных в области $(-\infty; +\infty)$.

Очень важно выйти на границы применения нормальных распределений и рассматривать различные типы распределений. Однако при выборе распределений нужно помнить, что

это лишь статистическая модель, адекватно отражающая свойства реальных физических величин лишь при определенных условиях [3].

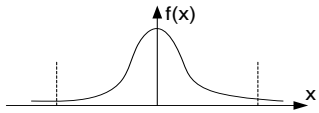
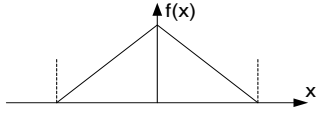
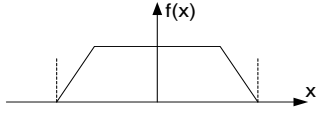
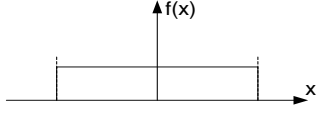
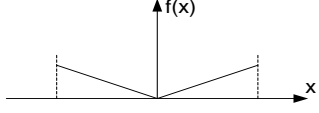
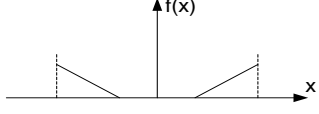
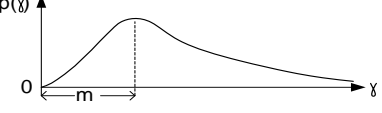
Мы сталкиваемся с необходимостью исследования «хвостов» распределений, что обычно ассоциируется с эффектом наложения ряда маловероятных случайных факторов (факторных накладок). Большие углы крена в полете – это итог таких накладок (кроме маневра ВС).

При этом нужно помнить, что реальные физические величины, такие как параметры полетов – крен, тангаж, курс, высота, угол атаки и т.д., всегда ограничены. В табл. 1 приведены типовые плотности вероятностей распределений и показана степень учета «хвостовых эффектов» при разных распределениях. При анализе больших кренов с использованием гистограмм и вероятностных распределений (по дифференциальной плотности вероятности) их необходимо рассматривать как маловероятные, а значит, «хвостовые» эффекты плотностей распределений параметров полета. Безусловно, это новый подход к аналитике параметров полета при элиминации или минимизации таких ошибок летного состава как потеря пространственной ориентировки (ППО) [4].

Последние авиапроисшествия, связанные с потерей пространственной ориентировки летными экипажами :

1. Ми -24В (ВВС), 19.02.1989г.;
2. А – 310 – F – OGOS, 22.03.1994г. рейс Шереметьево – Гонконг;
3. Ту -154 Б1 RA – 85164, 6.12.1995г. рейс Южно-Сахалинск – Хабаровск;
4. Ка 0 27 ПС (ВВС), 22.10.1997г. н.п. Торжок;
5. Saab -340, 10.01.2000г., аэропорт Цюрих, Швейцария;
6. А – 320, 2000г., Бахрейн;
7. Ту – 154 М RA 85845, 3.07.2001г., аэропорт Иркутск;
8. Ми – 8 МТВ – 1, ГТК «Россия», ноябрь 2005г., (АПБЧЖ);
9. А – 320, АРМ – АВИА, 03.05.2006г.;
10. В – 737 – 500 «Аэрофлот – Норд», 14.09.2008, Пермь. [1];
11. В-737-200 EX-009, АК «Интерэйр» Киргизстан, 24.08.2008г. А-Д Манас [1, 4].

Таблица 1. Моменты появления маловероятных «хвостов» распределений ($p < 0,003$)

Распределение	Плотность вероятности	Доверительный 99,7% интервал	Коэффициенты «хвостового» эффекта K_x
Нормальное		$\pm 3\sigma$	$K_x=3/3=1$
Треугольное (Симпсона)		$\pm 2,4\sigma$	$K_x=3/2.4=1.25$
Трапецевидное		$\pm 2,3\sigma$	$K_x=3/2.3=1.3$
Равномерное		$\pm 1,7\sigma$	$K_x=3/1.7=1.76$
Антимодальное I		$\pm 1,4\sigma$	$K_x=3/1.4=2.14$
Антимодальное II		$\pm 1,8\sigma$	$K_x=3/1.8=1.67$
Логарифмически-нормальное		$\pm 3\ln\sigma$	$K_x=3/\ln 3=2.75$ $K_x=3/\lg 3=6.25$

Из таблицы 1 следует, что, если принять «хвостовой» эффект нормального распределения равным единице: $K_x=3/3=1$, то можно провести сравнительный анализ «хвостовых» эффектов и других распределений по моментам появления маловероятных ($p < 0,003$ или доверительном 99,7% интервале) «хвостов». Из таблицы видно, что фактически все указанные в таблице распределения имеют более интенсивные «хвостовые» эффекты по сравнению с нормальным распределением. Аналитические расчеты показали, что наиболее большой «хвост» имеет логарифмически нормальное распределение (ЛНР) с коэффициентом «хвоста», равным от 2,75 до 6,25 в зависимости от величины основания логарифма. Следовательно, можно сделать вывод о том, что ЛНР является предпочтительным по сравнению с другими распределениями при моделировании проблемных ситуаций, связанных с выходом в полете на большие углы крена (БУК).

Часто нормативы безопасности задаются некоторыми ограничениями на значения показателей безопасности (ПБ), например:

$$\begin{aligned}
 X &\geq X_{\min} , \\
 X &\leq X_{\max} , \\
 X_{\min 1} &\leq X \leq X_{\max} .
 \end{aligned}$$

В этом случае объекты, имеющие значения ПБ в границах допусков, удовлетворяют представляемым требованиям, а объекты, имеющие значения ПБ вне зоны допусков, этим требованиям не удовлетворяют. Данная постановка задачи параметрической надежности является классической.

После описывания ПБ некоторыми плотностями распределения вероятностей $f(x)$, получим выражение для риска (рис. 1) [5]:

$$r_1 = 1 - \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x) dx$$

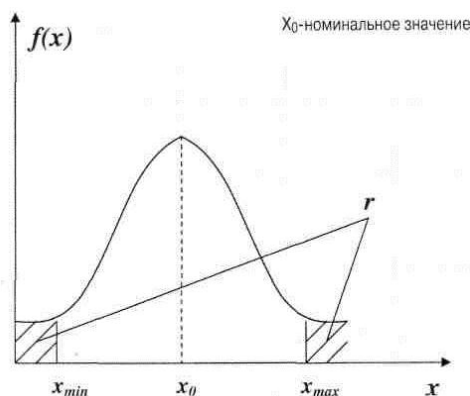


Рис.1. Определение риска r при двухстороннем допуске.

Риск рассматривается как «вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

Безусловно, следует считать, что нарушение при посадках – это основной информационный канал для получения статистических данных. Нарушение полётного задания или отклонение параметров от допустимых обычно фиксируются при анализе полетной информации с помощью СОК – систем объективного контроля. Эти данные мы и используем как экспериментальные.

Очень важно было оценить так называемые «достоверные события» с точки зрения разницы законов распределения, особенно по параметру «крен».

Существующими подходами можно определить риск правого или левого крена, но нельзя определить риск потери направления крена. В этом недостаток этого метода измерения риска.

Метод модульных преобразований.

Рассмотрим модульные преобразования по γ_{\max} на некоторых примерах.

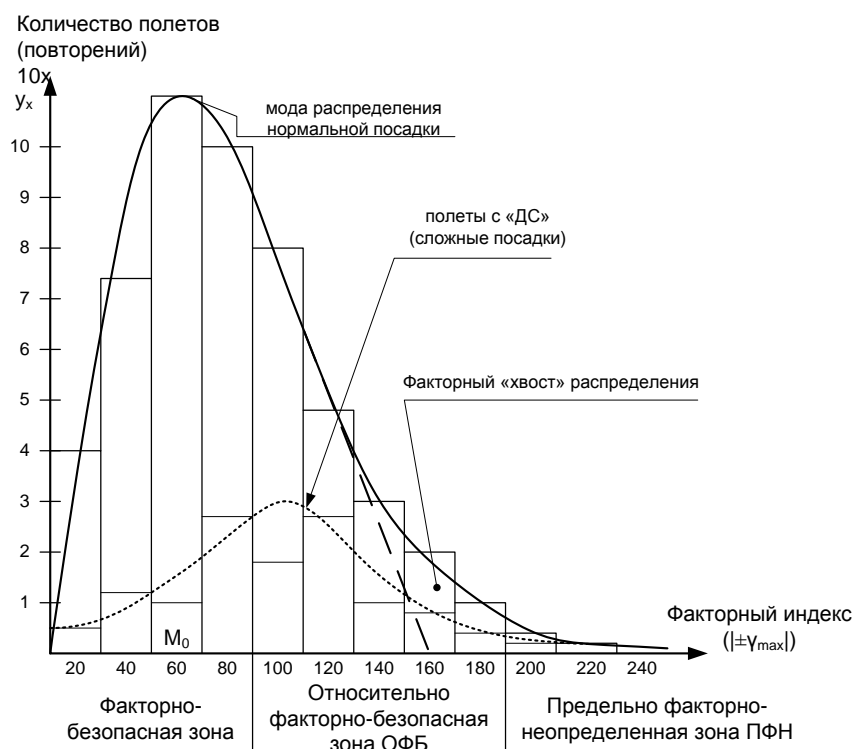


Рис. 2. Распределение нормальных полетов ИЛ-62М на международных трассах без замечаний летного отряда [2]

(ДС-достоверные события по СОК; ФБ-факторно-безопасные полеты; ОФБ-относительно факторно-безопасные полеты; ПФН – предельно-факторно-неопределенные полеты)

На рис. 2 представлены законы распределения максимальных отклонений угла крена для полетов «без замечаний авиационных специалистов» (нормальные посадки) и посадки с «ДС» (сложные посадки). Из сравнения распределений видно, что в качестве показателя риска при посадках следует выбирать величину вариаций моды распределений, т.е. отличие моды распределения нормальной посадки от моды распределения сложной посадки:

$$\text{var } r = M_{\bar{n}} - \dot{I}_i$$

где $M_{\bar{n}}$ – величина моды закона распределения нормальной посадки БЗ,
 M_c – величина моды закона распределения сложной посадки с ДС.

По разнице плотностей распределений это очень хорошо видно. Отсюда следует, что при оценке риска посадки и решении проблемы ALAR в целом с точки зрения оценки риска нужно брать не один полет или совокупность полетов одной категории, а как минимум «парные» полеты, т.е. полеты, отличающиеся сложностью их выполнения.

Между тем, при оценке по одному распределению считается, что допуск «вырезает» из плотности вероятности площадь, соответствующую вероятности исправного состояния.

В реальных полетах, как видно из рис. 2, модульные распределения по максимальному крену оказались ассиметричными и, возможно, логарифмически-нормальными. Однако, следует заметить, что переход от нормальных распределений к модульным и дополнительная трансформация законов распределения носит достаточно сложную структуру и природу трансформации. В сущности, виды модульных распределений являются неоднородными к величине среднеквадратичного отклонения (дисперсии) исходного распределения – чем больше величина дисперсии, тем ближе модульное распределение к логарифмически- нормальному распределению.

В частности, при исследовании законов распределения тренировочных полетов по модулям γ_{\max} проводил С.В. Корнеев [5]. На КТС – ТУ 154Б2 были получены результаты, что

максимальные отклонения по крену распределены при увеличении факторной нагрузки на экипаж по распределению Релея – рис.3.

- I – полеты без отказов (УТО «А»);
- II – полеты без отказов (УТО «Б»);
- III – полеты с отказами (УТО «А»);
- IV - полеты с отказами (УТО «Б»);

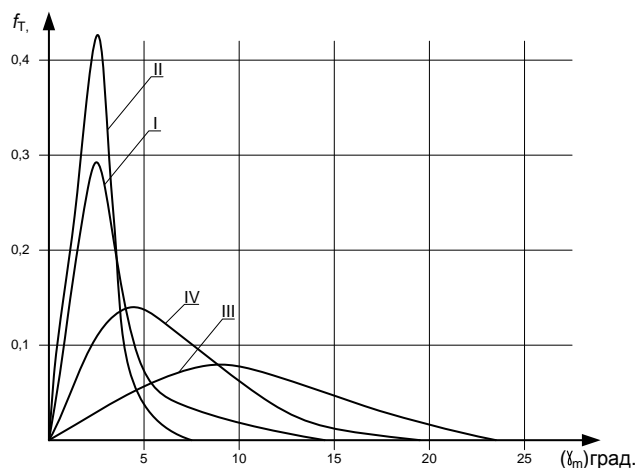


Рис. 3. Распределение максимальных отклонений угла крена на КТС ТУ-154Б2 [5].

Однако, необходимо понимать, что модульные распределения по γ_{\max} , показанные на рис. 2 и 3 имеют один общий признак: ЛНР и распределение Релея несимметричны и имеют качественно выраженный «хвост» распределения. Наличие «хвоста» модульных распределений γ_{\max} позволяет разработать методологию оценки риска больших кренов по «хвостовым» эффектам.

Разработанная методология оценки риска БУК по модульным распределениям γ_{\max} представлена на рис. 4 [7].

В качестве новизны такой методологии следует отметить, что ЛНР (или распределение Релея) разделяется на две части – каноническую и «хвостовую», несущих разную информацию о потенциальной опасности (риске) БУК, что позволяет производить моделирование ППО летными экипажами. Исходным пунктом такого моделирования является то, что потеря направления крена (или неопределенность оценки его) вносится в математическую модель с помощью модульного функционального преобразования. Модульное преобразование по γ_{\max} дает возможность «потерять» направление изменения крена, тем самым имитировать ППО ВС летными экипажами.

Статистически такая модель осуществляется так. Анализируются расшифровки полетов на основе экспресс-анализа полетной информации по СОК в авиакомпании. По каждой расшифровке определяется максимальное значение крена при заходе на посадку и посадке. При этом учитываются максимальные отклонения как левого, так и правого крена. Составляется таблица отклонений по модулю γ_{\max} , строится гистограмма по γ_{\max} . Далее, в соответствии с рис. 4, после сглаживания модульных гистограмм производится выделение канонической части модульного распределения параметров, затем проверка по критериям согласия канонической части. После этих процедур определяется и проводится аппроксимация «хвоста» не-канонической части и определяется зона повышенного риска.

Сравнение канонической части ЛНР с «хвостовой» дает возможность определить риск БУК через соотношение площадей «хвостовой» и канонической частей распределений с использованием формул таблицы 2. Из графиков таблицы наглядно видно, что ситуация

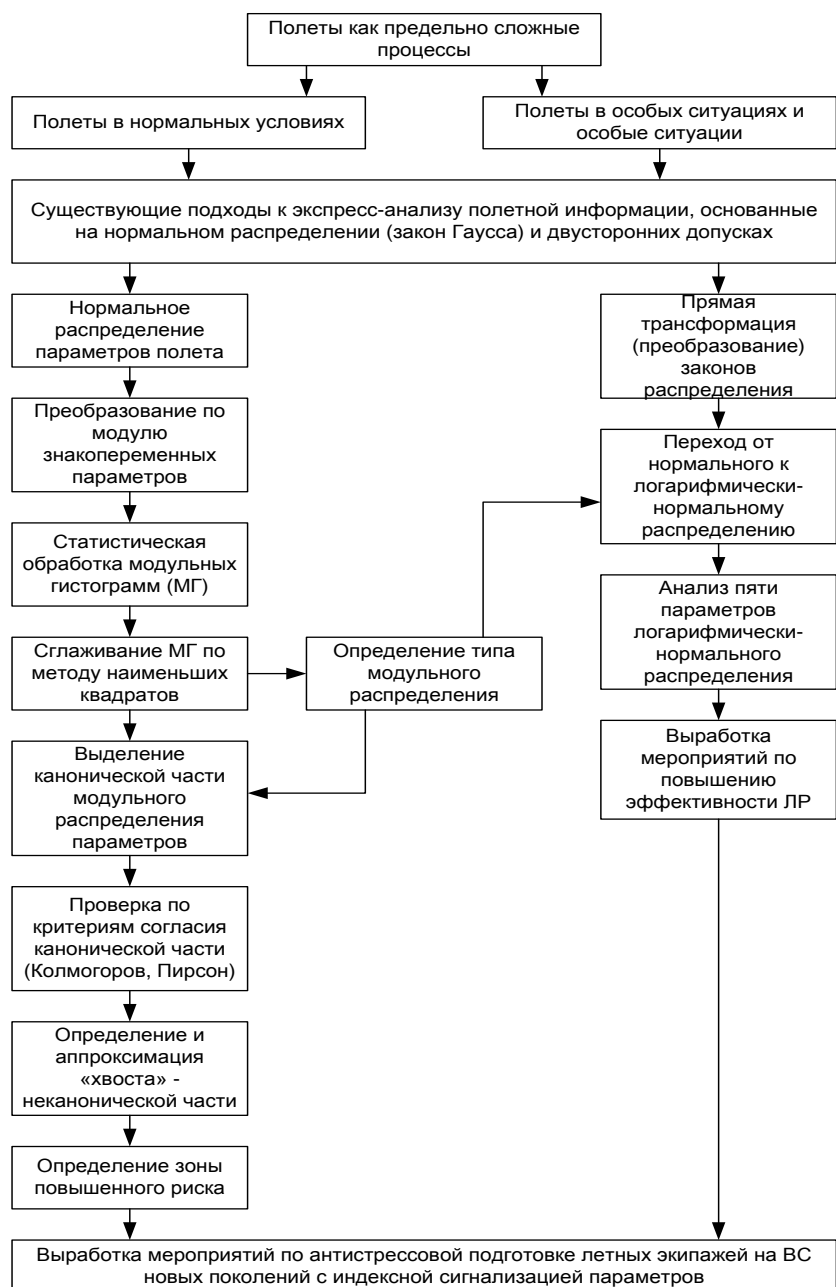


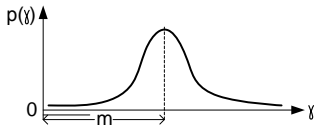
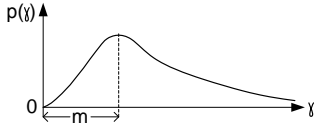
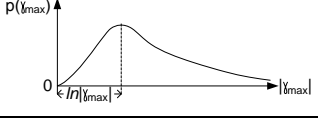
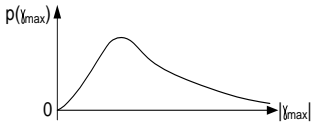
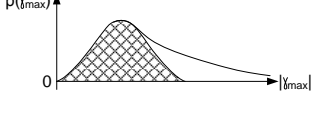
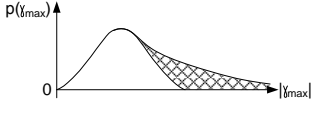
Рис.4. Функциональные преобразования статистических и вероятностных законов управления летной работой при эксплуатации ВС разных поколений [7-8]

ППО может появляться при увеличении «хвостовых» эффектов распределений (росте величины БУК). Каноническая часть распределения ЛНР, представляющая собой нормальную функцию распределения (по закону Гаусса) не несет потенциальной опасности БУК, а риск БУК образуют «хвостовые» эффекты распределений полетов.

На рис. 5, 6 показаны виды распределений для различных типов ВС (В-737 и Ил-62 М). Из рисунков видно, что эти ЛНР качественно отличаются шириной канонической части и характеристиками «хвостов» (длиной «хвоста», его площадью, уровнями «хвостовых» эффектов и т.д.).

Учитывая то, что статистика по авиапроисшествиям для этих ВС различная (на ВС Ил-62М нет проблемы ППО), можно сделать вывод о том, что уровень «хвостовых» эффектов распределения пока еще нормальных полетов даст возможность управлять рисками БУК, и степень их уменьшения является гарантией от ошибок типа ППО.

Таблица 2. Моделирование проблемной ситуации ППО по БУК

	Распределения $f(y)$	Графики
Нормальная посадка	$f(y) = \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-m)^2}{2\sigma_h^2}}$	
Сложная посадка («хвостовой эффект»)	$f(y) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-m)^2}{2\sigma_c^2}}$ $\sigma_c \gg \sigma_h$	
Моделирование ППО:		
- вид модульного распределения	$f(\ln \gamma_{max}) = \frac{1}{\sigma_{max} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(\gamma_{max}) - \ln(\gamma_{max}))^2}{2\sigma_{max}^2}}$	
- модульные функции γ_{max}	А) $\gamma_{max} = a^{bx} + c$; $f(\gamma_{max}) = \frac{1}{ b \ln a (\gamma_{max} - c)} f(y)$; Б) $\gamma_{max} = \ln a \cdot \gamma + b$; $f(\gamma_{max}) = \left \frac{e^{\gamma_{max}} - b}{a} \right f(y)$	
- модули перехода	$\frac{1}{ b \cdot \ln a }$; $\left \frac{e^{\gamma_{max}} - b}{a} \right $	
Каноническая часть ЛНР	$f(\gamma_{max})_k = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\gamma_{max} - m)^2}{2\sigma_k^2}};$ $\sigma_k < \sigma_{max};$ $\sigma_k = \frac{\ln \gamma_{max} }{3}$	
Логарифмический «хвост» ЛНР (по площади)	$f(\gamma_{max})_x = 1 - \int_0^{6\sigma_k} (\gamma_{max})_x$	

Моделирование по модульным распределениям БУК является также не только средством элиминации ППО, но и представляет собой весьма эффективный метод прогноза для предотвращения АП по причине ППО на основе дополнительного анализа (по предлагаемой методике и методологии) данных экспресс-анализа расшифровок полетных данных. Как известно, полетные данные по параметрам полетов анализируются при таком первичном анализе без функциональных преобразований основных параметров полета (крен, тангаж, курс, высота и т.д.) как случайных величин.

Первичный анализ, как уже было указано выше, основан на двухсторонних допусках в соответствии с летными ограничениями и при этом анализ законов управления ВС не выходит за сферу прямого анализа этих параметров или их угловых величин, регистрируемых БУС.

Однако, решение проблемы ППО ЛЭ требует не просто прямой обработки параметрических координат полета в разных системах координат, а обработки с функциональными преобразованиями знакопеременных параметров полета по модулю или другим преобразованиям случайных величин отклонений параметров в полете [8, 9].

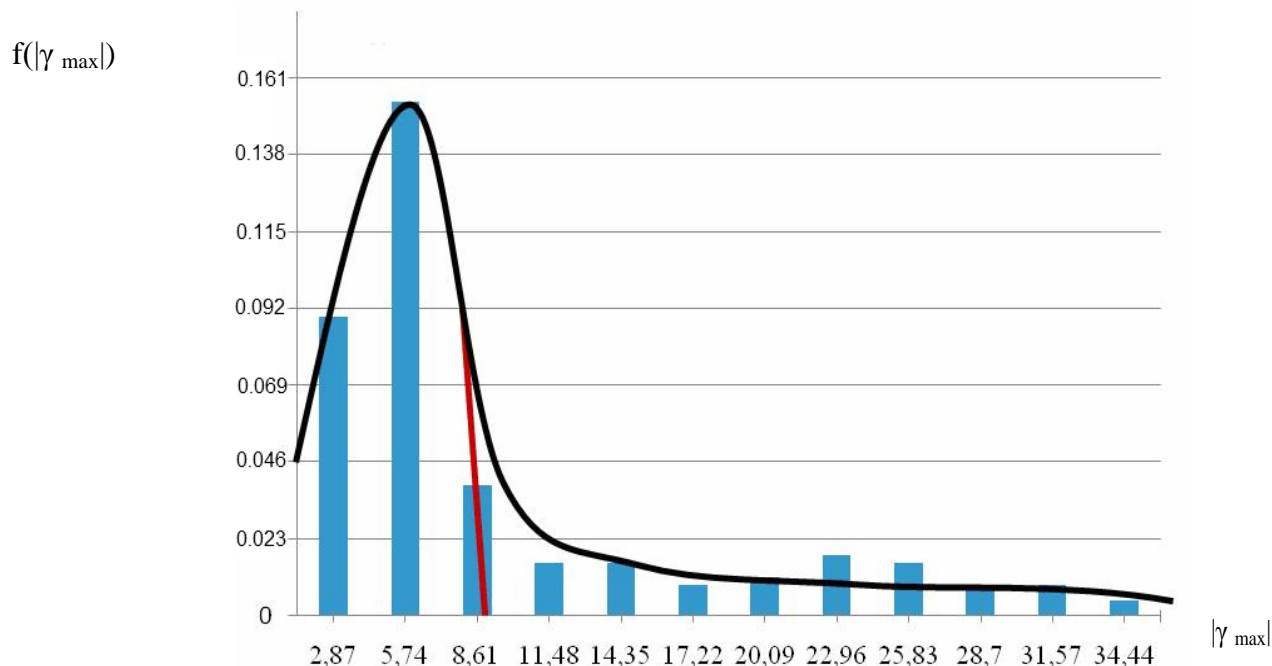


Рис. 5. Плотность распределения полётов по модулю максимального угла крена (γ_{\max} в град.) при заходе на посадку самолёта Боинг-737

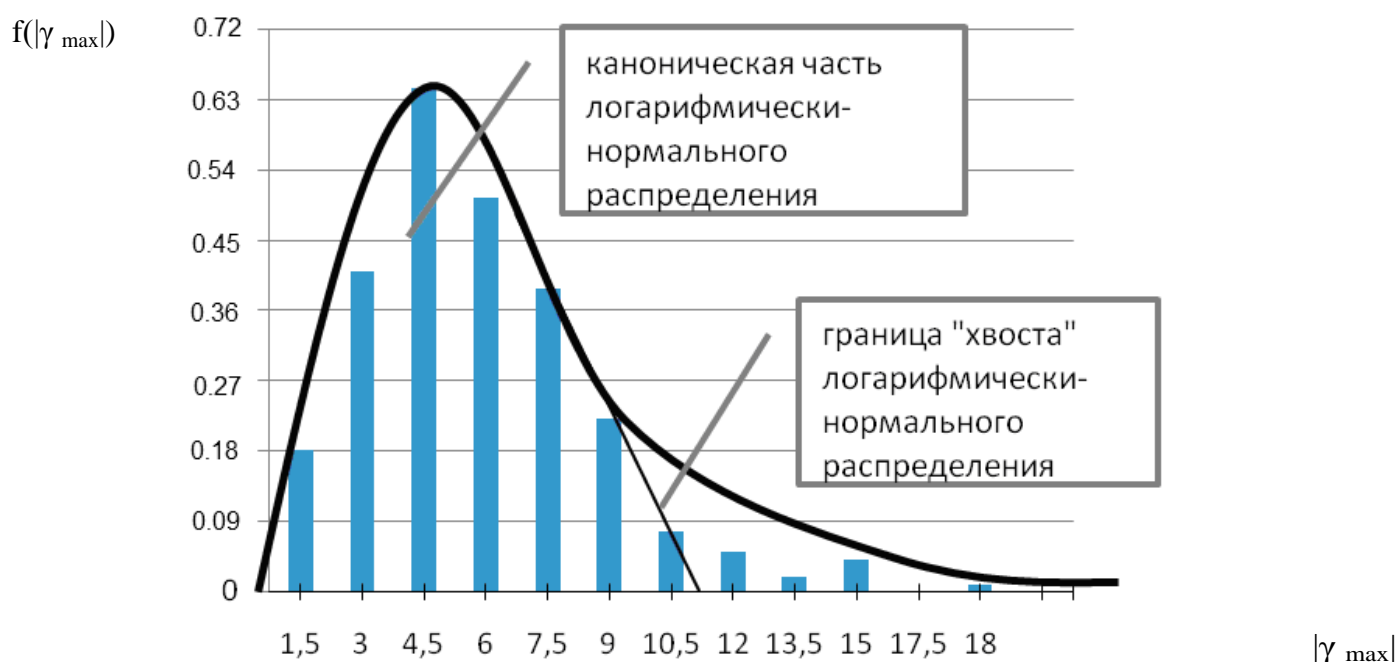


Рис.6. Плотность распределения полётов по модулю максимального угла крена (γ_{\max} в град.) при заходе на посадку самолёта Ил-62 М

В реальных полетах модульные распределения по максимальному крену оказались логарифмически-нормальными. Однако, следует заметить, что переход от нормальных распределений к модульным и дополнительная трансформация законов распределения носит достаточно сложную структуру и природу трансформации. В сущности, виды модульных распре-

делений являются неоднородными к величине среднеквадратичного отклонения (дисперсии) исходного распределения – чем больше величина дисперсии, тем ближе модульное распре-



Рис.7.

деление к логарифмически-нормальному распределению. В качестве примера рассмотрим массив экспериментальных данных γ_{\max} для подбора теоретического распределения (рис. 7).

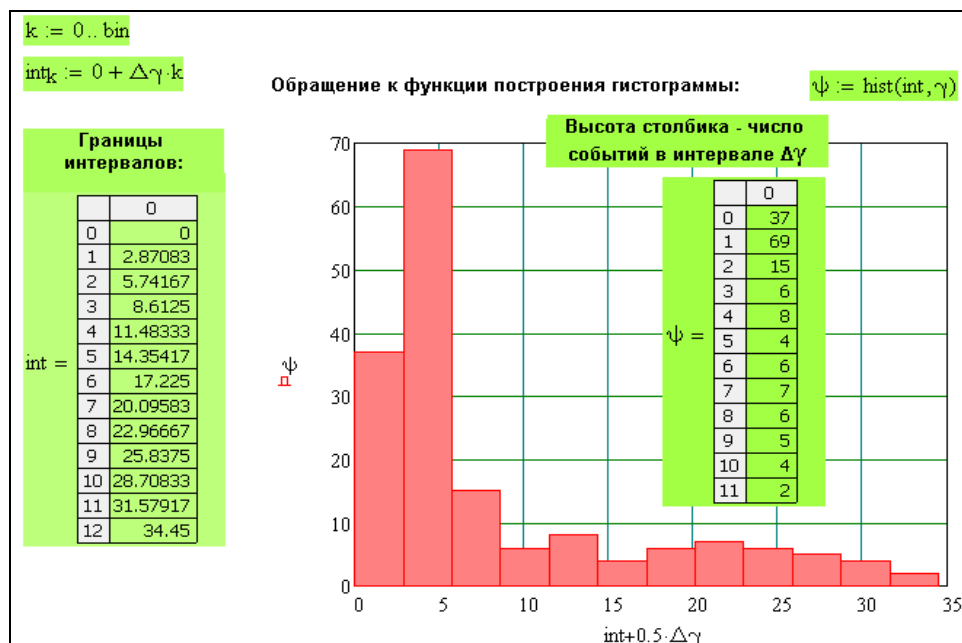


Рис. 8.

Для получения оценок параметров теоретической модели построим диаграмму распределения значений γ_{\max} (рис. 8) и гистограмму плотности распределения значений γ_{\max} (рис. 9).

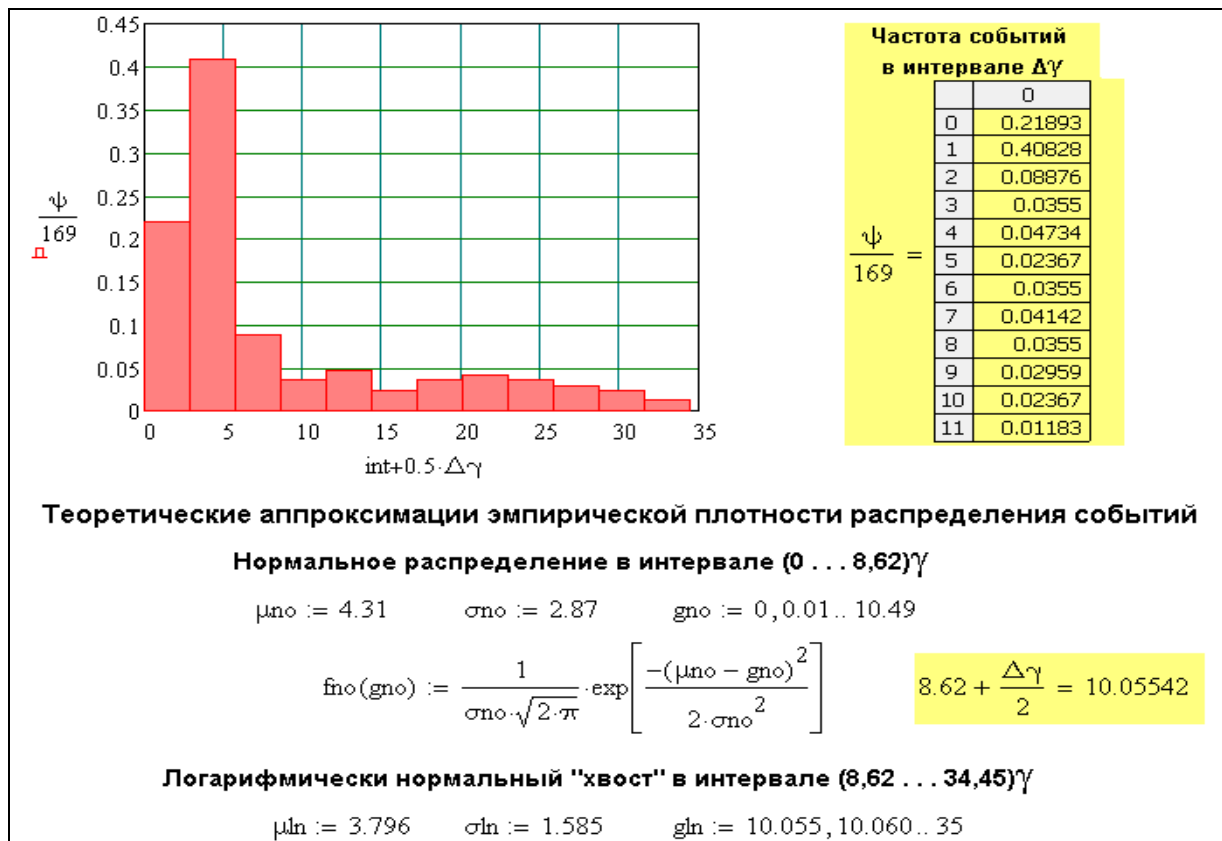


Рис. 9.

Нормальная ($\mu=4.31$, $\sigma=2.87$) и логарифмически нормальная ($\mu=3.796$, $\sigma=1.585$) аппроксимации исходной статистики представлены на рис. 10; проверка согласия модели и исход-

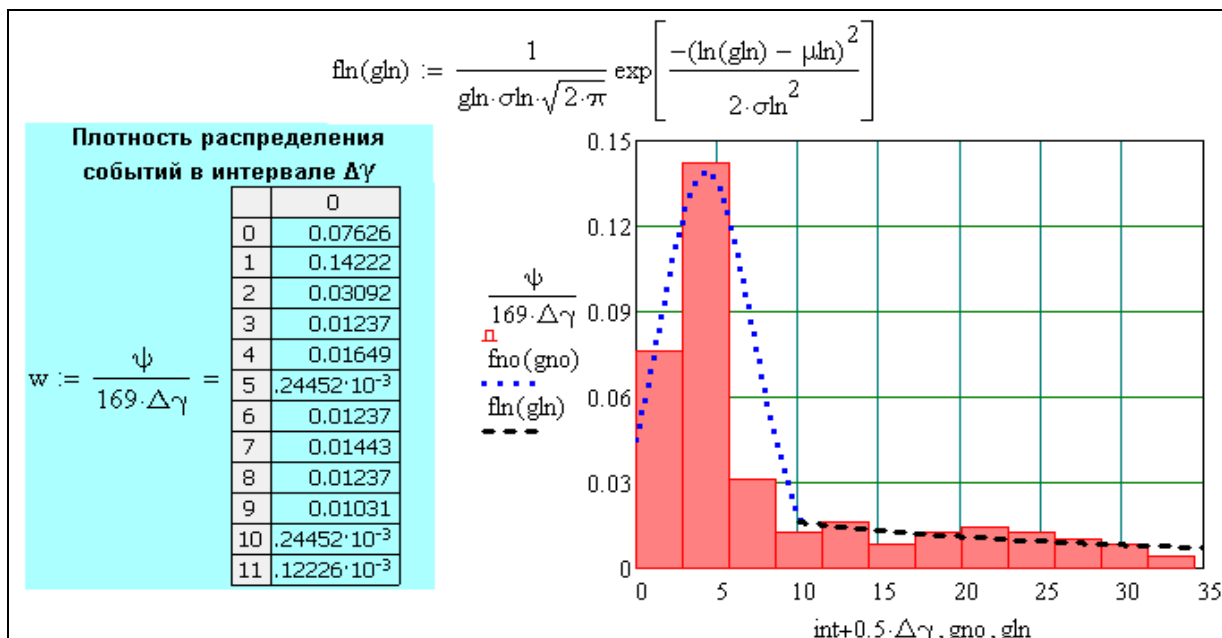


Рис. 10.

ной статистики по критерию Пирсона (рис. 11) даёт вполне приемлемое значение $p = 0.75$.

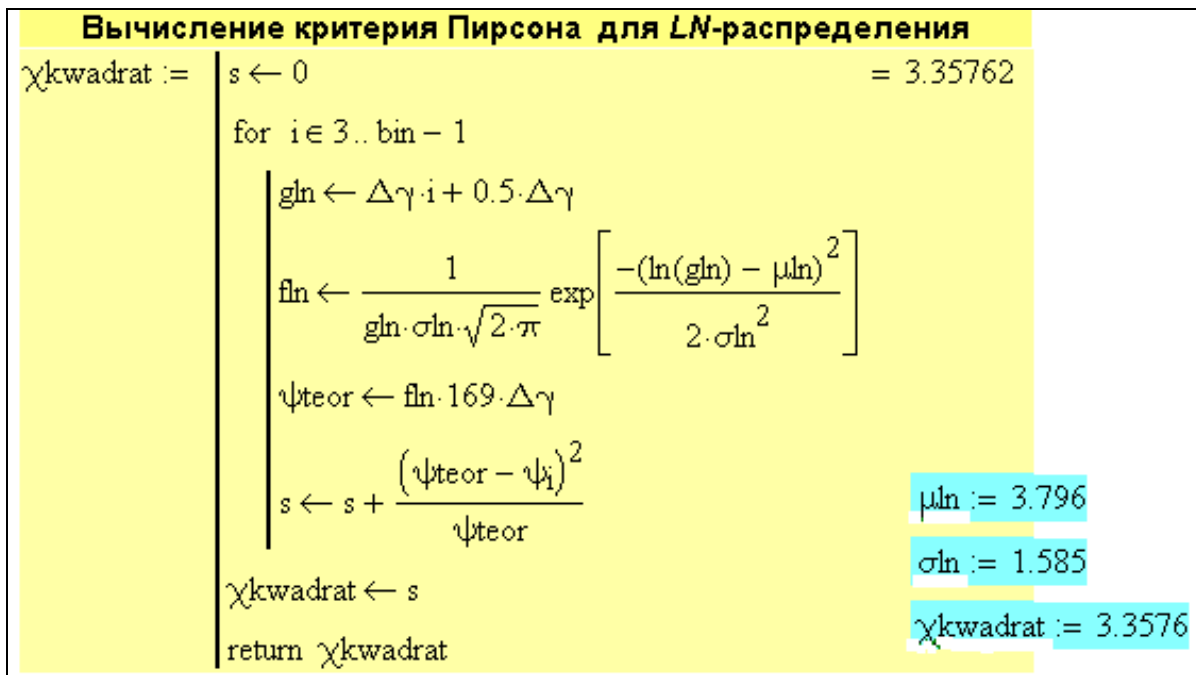


Рис. 11.

Выводы:

1. Измерение рисков БУК по модульным распределениям при предотвращении АП является важным аспектом в решении проблемы ППО.
2. Учитывая то, что ЛЭ теряют направление изменения крена при больших углах крена, следует в качестве математической модели использовать модульные преобразования. Модульные величины позволяют ввести неопределенность в определении направления БУК.
3. Модульные распределения (статистические и вероятностные) полетов при эксплуатации ВС разных поколений приводят к необходимости рассмотрена двух типов сигнализации при полетах с большими углами крена – знакопеременной и индексной.
4. При знакопеременной сигнализации функция определения направления БУК производится с помощью автоматики, при индексной сигнализации эта технологическая операция выполняется летным экипажем, что увеличивает их операционную загрузку и приводит к увеличению риска БУК.
5. Модульные распределения параметров полетов по своему вероятностному характеру являются логарифмически-нормальными законами, которые обладают определенной асимметрией и имеют логарифмические «хвосты» распределений.
6. Асимметрия модульных распределений позволяет выделить каноническую (нормальную) часть распределения и «хвост» распределения. Учитывая то, что логарифмический «хвост» распределения несет в себе информацию о больших отклонениях параметров полета, следовательно, и о больших углах крена, возникает возможность измерить риски БУК через соотношение канонической и «хвостовой» частей распределения.
7. При анализе новой модели причинности ошибок возникает необходимость использования также обобщенных вариационных подходов: математический аппарат анализа максимальных отклонений параметров по зонам УРС.

Список литературы:

1. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников «Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства» в 2008 году. Доклад МАК. ВТ. – апрель 2009. - №16.
2. Хохлов Е.М. Безопасность полетов и человеческий фактор: парадоксы научной истины на рынке интеллекта и наши приоритеты. М.: Безопасность полетов. – 1997. - №4. - С. 6 – 19.
3. Грибов В.М., Грищенко Ю.В., Скрипеч А.В., Стрельников В.П. Теорія надійності систем авіоники. Частина 1. Визначення, показники, моделі відмов, методи розрахунку. Навчальний посібник (гриф надано Міністерством освіти і науки України), К.: Книжкове видавництво НАУ, 2006, 324 с.
4. Овчаров В.Е. Вечная проблема. ISSN 0235-5000 Проблемы безопасности полетов. - 2009. №. 1. - С. 43-48.
5. Александровская Л.Н., Захаревич А.П. Методологические основы расчета и нормирования рисков в задачах обеспечения безопасности //Мир авионики. Журнал российского авиаприборостроительного альянса. - 2005. - №4. - С.40-42.
6. Корнеев С.В. Исследования явления «факторного резонанса» при обеспечении производственных процессов // Сборник научных трудов КИИГА «Системы безопасности труда в технологических процессах гражданской авиации» - К.: КИИГА, 1988, - С.91 – 95.
7. Гуленко В.Д. Новые модели причинности ошибок летного состава и перспективы их применения в гражданской авиации. Проблемы безопасности полетов. – 2007. - №9. – С.53-65..
8. Гуленко В.Д. Новые подходы к оценке сигнализации больших углов крена на воздушных судах различных поколений. – Материалы IX международной научно-технической конференции «Авиа – 2009». - К.: НАУ, – 2009. – С.12.13 – 12.17.
9. Пленцов А.П. . Решение проблемы "потеря пространственной ориентировки лётчиком в полёте"// Мир авионики. Журнал российского авиаприборостроительного альянса. - 2002. - №2. - С.30-32.