

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОМ ОБОБЩЕННЫХ ЭНТРОПИЙ

А.А. Тризна¹, С.А. Янкова²

¹*Национальный авиационный университет*

²*Научно-методологический центр процессного анализа*

Приведены обобщенные данные по существующим показателям и критериям технической эксплуатации авиационной техники и безопасности полетов, а также классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных мер и определены области их практической применимости. Впервые предложена обобщенная таблица с номограммами для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер.

Наведено узагальнені дані щодо існуючих показників та критеріїв технічної експлуатації авіаційної техніки та безпеки польотів, а також класифікацію показників технічної експлуатації авіаційної техніки та інженерної психології як складних полікомпонентних імовірнісних мір та визначення області їх практичної застосовності. Вперше запропоновано узагальнену таблицю з номограмами для інженерного розрахунку областей практичного застосування складних полікомпонентних імовірнісних мір.

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни техническая эксплуатация (ТЭ) воздушных судов (ВС), ее теория и практика, вступила в этап упорядочивания данных и научно-методологического обобщения в практическом, логическом и математическом смысле [1].

Обобщенной характеристикой этого этапа является рассмотрение эксплуатации не как независимого этапа, а как центрального этапа в жизненном цикле существования промышленной продукции; необходимость развитой классификации и уточнения определений всех показателей и критериев технической эксплуатации; обобщенная аналитика системных свойств (эффективность, надежность, ремонтпригодность, долговечность, стоимость и др.) и использование комбинаций этих свойств.

Цель — обобщение данных по существующим показателям и критериям технической эксплуатации авиационной техники (АТ) и безопасности полетов, классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных величин этих показателей и определение области их практической применимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для эффективного анализа уровня безопасности полетов и качества технического обслуживания (ТО) ВС необходимо использовать наиболее

информативные показатели технической эксплуатации АТ, а также знать области применения этих показателей.

Основным математическим аппаратом для оценки показателей и критериев технической эксплуатации авиационной техники является теория вероятностей, теория случайных процессов и статистических методов (методы математической статистики и общая теория статистики) [2].

Для оценки информативности и областей применимости показателей был составлен обобщенный перечень, существующих показателей и критериев технической эксплуатации авиационной техники [3–5]. В данный перечень вошли следующие показатели:

1) вероятность безотказной работы сложного устройства:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N p_i, \text{ где } p_i \text{ — вероятность безотказной работы } i\text{-го элемента,}$$

N — число элементов системы;

2) вероятность появления отказа в системе:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^N q_i, \text{ где } q_i \text{ — вероятность появления отказа } i\text{-го элемента;}$$

3) вероятность безотказной работы системы с отдельным резервированием:

$$P_{\text{разд}} = \prod_{j=1}^N p_j, \text{ где } p_j \text{ — вероятность безотказной работы последовательно}$$

включенного элемента системы;

4) вероятность безотказной работы системы с общим резервированием:

$$P_{\text{общ}} = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} q_i, \text{ где } q_i = 1 - P_i, \text{ } m \text{ — число резервных каналов или}$$

компонентов,

5) минимально допустимая вероятность отказа:

$$q_{\min} = 1 - q_{\max};$$

6) вероятность появления не более k событий (замен компонентов ВС):

$$P(R > n) = \sum_{k=0}^N p_{kn}, \text{ где } R \text{ — общее число замен, } n \text{ — действительное число}$$

необходимых замен, p_{kn} — вероятность появления отказа компонента ВС;

7) вероятность появления идентичных ошибок P_T сразу у двух операторов (А та Б):

$$P_T = \sum_{s=1}^N \left[P_s \sum_{i=1}^N (P_{si} P'_{si}) \right], \text{ где } P_s \text{ — вероятность обеспечения времени,}$$

необходимого для выполнения операции S ; P_{si} — вероятность того, что оператор А совершит ошибку типа i при операции S ; P'_{si} — то же самое для оператора Б.

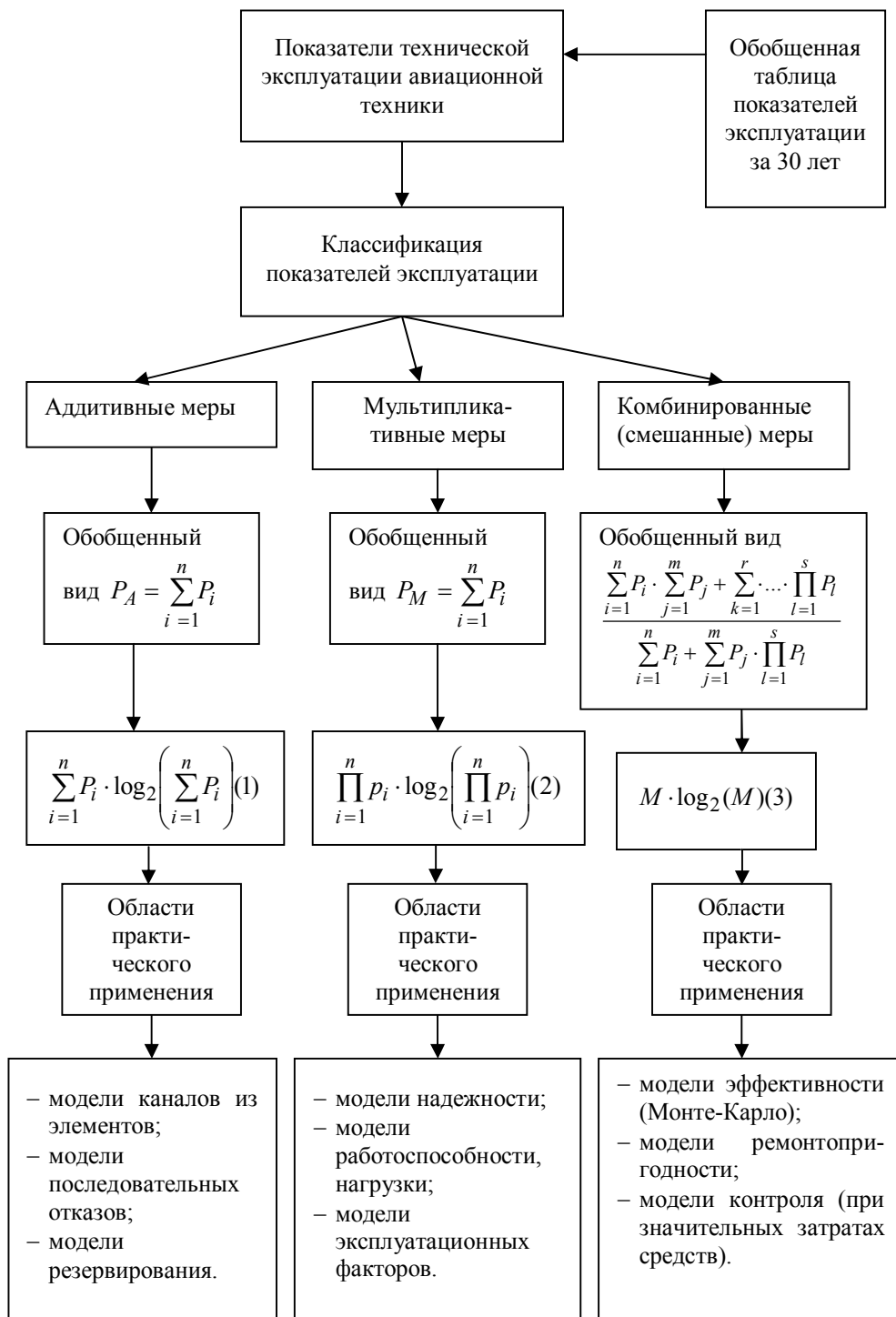


Рис. 1 Классификация показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии как сложных поликомпонентных вероятностных мер

Анализ данного обобщенного перечня позволил нам создать классификацию показателей технической эксплуатации авиационной техники и инженерной психологии. Основываясь на том, что данные показатели являются поликомпонентными вероятностными величинами (мерами) [2], мы разделили их на три основных класса (см. рис. 1):

1) аддитивные (могут быть представлены функцией вида: $f(a + b) = f(a) + f(b)$);

2) мультипликативные (могут быть представлены функцией вида: $f(ab) = f(a) \cdot f(b)$);

3) комбинированные (представляют собой комбинацию первых двух классов).

В качестве объекта нашего исследования мы выбрали мультипликативные и аддитивные поликомпонентные вероятностные меры.

Для определения областей практической применимости исследуемых мер, мы использовали функцию энтропии Хохлова [6].

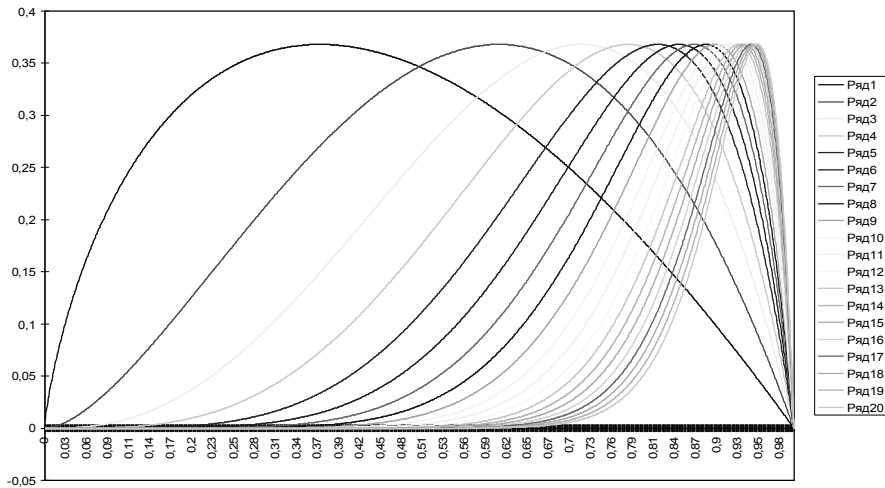


Рис. 2. Номограммы функции энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер

Для построения графиков по оси абсцисс отложены значения вероятностей $p_i = 0 \dots 1$ ($i = 1 \dots n$), которые входят в состав поликомпонентной вероятностной меры. По оси ординат отложены значения функции энтропии, вычисленные для разных значений вероятностей составляющих. Построенные графики представляют собой зависимости вида:

$$E(p_i) := - \left(\prod_{i=1}^n p_i \cdot \ln \left(\prod_{i=1}^n p_i \right) \right),$$

где n — число вероятностных компонент, которые входят в состав поликомпонентной вероятностной меры (рис. 2) [6, 7].

Рассмотрим анализ мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер. На рис. 2 показаны действия 1...20 факторов. В результате мультипликативной накладки область информации сжимается в область высоких вероятностей.

Для определения диапазона необходимого уровня информативности меры по оси абсцисс построенных графиков откладываем значения информативности меры $I(p_i)$. Поскольку максимальный уровень информации для реальных систем принимается равным $0,9-0,7$, примем за максимальное значение шкалы $I(p_i)$ значение $0,9$.

Таблица 1

Соответствие уровня информативности по шкалам энтропии $E(p_i)$ и меры $I(p_i)$

Значение по шкале $E(p_i)$	Значение по шкале $I(p_i)$
0,53	0,9
0,47	0,8
0,41	0,7
0,35	0,6
0,29	0,5
0,24	0,4
0,18	0,3
0,12	0,2
0,06	0,1
0	0

Функция энтропии достигает своего максимума при значении $E(p_i) = 0,53$, которое по шкале $I(p_i)$ эквивалентно максимальному значению $0,9$. Исходя из этого, мы составили табл. 1 соответствия шкал $E(p_i)$ и $I(p_i)$.

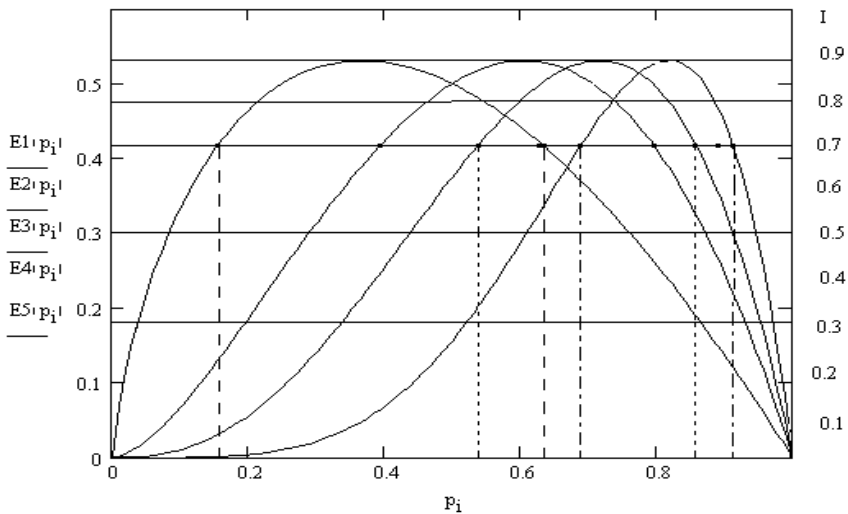


Рис. 3. Графический способ определения вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информативности

По этому графику можно определить вероятностный диапазон, в котором обеспечивается необходимый уровень информации для данной меры (рис. 3). Пример результатов оценки вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информативности, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Пример расчетов вероятностного диапазона, на котором функция энтропии мультипликативных поликомпонентных вероятностных мер обеспечивает необходимый уровень информации

Количество компонент	Границы вероятностного диапазона	
	P_{\min}	P_{\max}
$I = 0,8 (E(p) = 0,47)$		
1	0,205	0,557
3	0,591	0,823
5	0,657	0,89
$I = 0,7 (E(p) = 0,42)$		
1	0,161	0,625
3	0,544	0,855
5	0,694	0,91
$I = 0,5 (E(p) = 0,29)$		
1	0,084	0,76
3	0,44	0,913
5	0,609	0,947

По результатам данных в табл. 2 можно сделать вывод, что диапазоны, в которых мультипликативные поликомпонентные вероятностные меры дают нам наибольшее количество информации, принадлежат части полного вероятностного диапазона $0,7 \div 1$. Соответственно показатели, которые представлены в виде мультипликативных функций, будут наиболее информативны для оценки событий (отказы техники, ошибки операторов), которые находятся в области высоких вероятностей (имеют высокую вероятность наступления события).

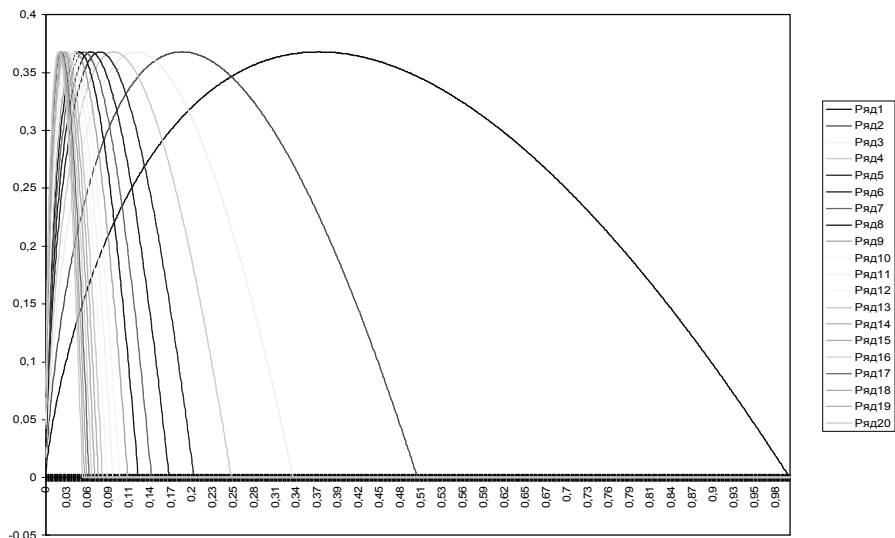


Рис. 4. Номограммы функции энтропии аддитивных поликомпонентных вероятностных мер

Аналогичным образом, проанализировав номограммы функции энтропии аддитивных поликомпонентных вероятностных мер, мы пришли к выводу, что наибольшее количество информации такие меры обеспечивают в области малых вероятностей ($0 \div 0,3$) (рис. 4). А показатели, которые представлены в виде аддитивных функций, будут наиболее информативны для оценки событий, которые имеют низкую вероятность наступления. Определить области практического применения основных показателей эксплуатации воздушных судов можно по табл. 3 и рис. 5.

Таблица 3

Определение областей практического применения основных показателей:
 надежности автоматики (вероятность безотказной работы),
 надежности оператора (вероятность безошибочной работы)

Аддитивность	Мультипликация
Вероятность безотказной работы	
$P_{AD} = \sum_{i=1}^n p_i(t)$	$P_{AD} = \prod_{i=1}^n p_i(t)$
Вероятность безошибочной работы	
$P_{on} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot P_{on/i}$	$P_{on} = \prod_{i=1}^n P_i(t)$
Обобщенная энтропия показателей	
$\pm \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\sum_{i=1}^n p_i \right) (I)$	$\pm \prod_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\prod_{i=1}^n p_i \right)$

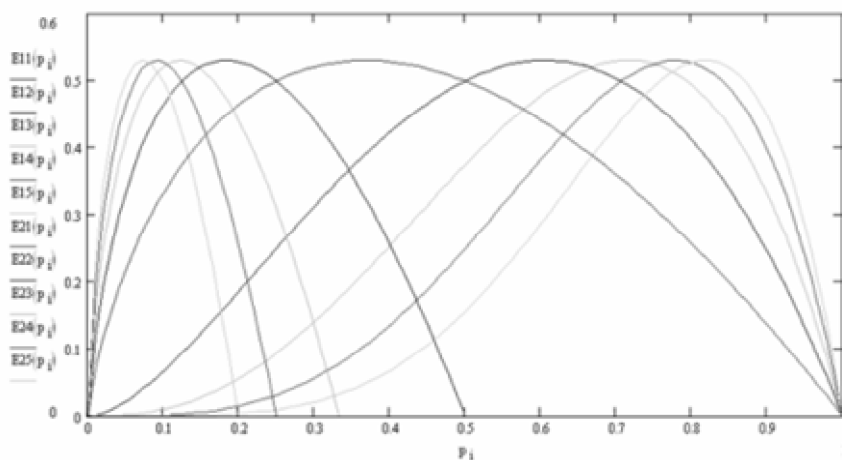


Рис. 5. Номограммы эффективности применения основных показателей

Из приведенных номограмм можно сделать следующие выводы:

1. Явление сжатия информации имеет большое значение, как в области малых вероятностей появления отказов техники или ошибок оператора, так и для области больших вероятностей.
2. Если для событий с малыми вероятностями использовать те же показатели, что и для событий с большими вероятностями появления этих событий, то это может привести к увеличению количества отказов техники или ошибок оператора. Это связано с тем, что эксплуатационный персонал

будет обладать недостаточным количеством информации для принятия правильного решения.

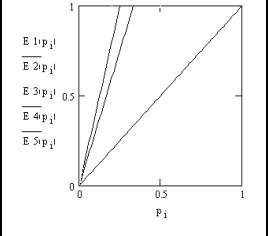
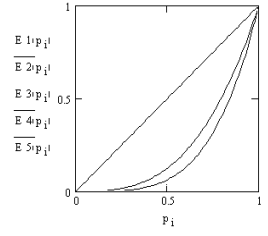
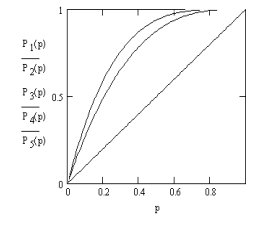
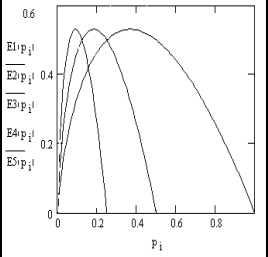
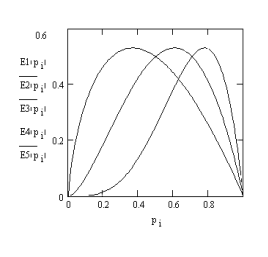
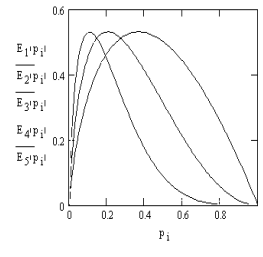
Для снятия ограничений методов теории информации в других областях можно использовать меру, которая называется энтропией Хохлова и в обобщенном виде записывается формулой $E = M \cdot \log_2 M$ и представляет собой формулу нормированной логарифмики [2, 6].

Примеры применения энтропии Хохлова для исследования поликомпонентных вероятностных мер приведены в таблице номограмм для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер (табл. 4).

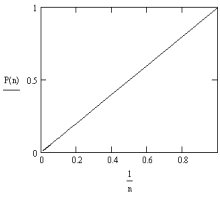
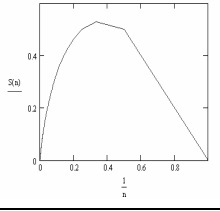
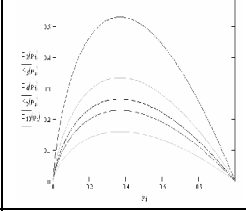
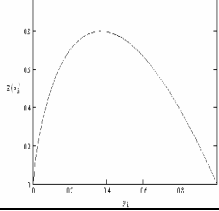
Данная таблица позволит повысить эффективность применения показателей технической эксплуатации АТ для оценки качества технического обслуживания ВС и уровня безопасности полетов.

Таблица 4

Таблица номограмм для инженерного расчета областей практического применения сложных поликомпонентных вероятностных мер

Характеристики меры	Аддитивные меры	Мультипликативные меры	Резервирование
Формула меры	$\sum_{i=1}^n P_i$	$\prod_{i=1}^n P_i$	$P_{II} = [1 - (1 - P)^n]$
Обобщенная энтропия меры $M \log_2 M$	$\pm \sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\sum_{i=1}^n p_i \right)$	$\pm \prod_{i=1}^n p_i \cdot \log_2 \left(\prod_{i=1}^n p_i \right)$	$[1 - (1 - p^n)] \cdot \log [1 - (1 - p^n)]$
Номограммы меры			
Номограммы $M \log_2 M$ (математические модели предельно сложных процессов)			
Диапазон вероятностей и его явления (область применения)	Малая вероятность (явление сжатия информации в сторону малых вероятностей)	Высокая вероятность (отсутствие сжатия информации в сторону малых вероятностей)	Явление расширения информации в процессе резервирования

Окончание таблицы 4

Характеристики меры	Формула равновероятности	Формула энтропии с произвольным основанием	Формула энтропии Шенона
Формула меры	$P_{II} = \frac{1}{n}$	—	—
Обобщенная энтропия меры $M \log_2 M$	$\frac{1}{n} \cdot \log_2 \left(\frac{1}{n} \right)$	$p_i \cdot \log_i(p_i)$	$-\sum_{i=1}^n p_i \cdot \log_2(p_i)$
Номограммы меры		—	—
Номограммы $M \log_2 M$ (математические модели предельно сложных процессов)			
Диапазон вероятностей и его явления (область применения)	Отсутствие эффективности мультипликации	Явление центрального ограничения	Отсутствие эффектов типа «мульти» и «адди»

Выводы

Теория и практика технической эксплуатации воздушных судов в настоящее время находится на стадии упорядочивания и обобщения данных. Для того чтобы стадия упорядочивания прошла эффективно, необходимо использование таких обобщающих подходов, как процессный подход, процессный анализ и обобщенная теория процессов.

Анализ показателей технической эксплуатации воздушных судов показал, что расчет областей практической применимости этих показателей необходимо проводить по обобщенной энтропии процесса. Разработанная классификация показателей эксплуатации ВС, которая базируется на рассмотрении данных показателей как поликомпонентных вероятностных величин (мер), позволяет определить область практического применения этих показателей при оценке качества технической эксплуатации авиационной техники.

Исследования закономерностей аддитивных и мультипликативных мер показал, что при увеличении числа компонент в показателе область практической применимости изменения аддитивного показателя переходит в область малых вероятностей, а мультипликативных — в область высоких вероятностей.

1. Хохлов Е.М. Процессная концепция безопасных полетов как формула мирового научного приоритета и методология защиты летного эксплуатанта / Е.М. Хохлов // ВИНТИ. Проблемы безопасности полетов. — 1994. — № 12. с. 28–39.
Khokhlov E.M. Process conception of flights safety as formula of world scientific priority and methodology of defence of flight operator. *VINITI. Problems of flight safety*, 1994, no 12, pp. 28–29.
2. Толковый словарь математических терминов. / О.В. Мантуров, Ю.К. Солнцев, Ю.И. Соркин, Н.Г. Федин. — М.: Просвещение, 1965. — 541 с.
Manturov O.V., Solntsev U.K., Sorokin U.I., Fedin H.G. *Explanatory dictionary of mathematical terms*. Moscow: Prosveschenie, 1965. 541 p.
3. Эксплуатация авиационного оборудования и безопасность полетов: Учеб. пособие для вузов гражданской авиации / В.Г. Денисов, В.В. Козарук, А.С. Кураев, М.И. Пальчих, И.М. Синдеев. — М. : Транспорт, 1979. — 240 с.
Denisov V.G., Kozaruk, V.V., Kuraev A.S., Palchikh M.I., Sindeev I.M. *Operation of aviation equipment and flight safety*. Moscow: Transport, 1979. 240 p.
4. Воробьев В.Г. Техническая эксплуатация авиационного оборудования: Учебник для вузов гражданской авиации / В.Г. Воробьев — М. : Транспорт, 1990. — 296 с.
Vorobev V.G. *Maintenance of aviation equipment*. Moscow: Transport, 1990. 296 p.
5. Павлов В.В. Эргономические вопросы создания и эксплуатации авиационных электрифицированных и пилотажно-навигационных комплексов воздушных судов: Учеб. пособие / В.В. Павлов, А.В. Скрипец — К. : КМУГА, 2000. — 460 с.
Pavlov V.V., Skripets A.V. *Ergonomic questions of creation and maintenance of the aviation electrical and flight-navigation complexes of aircrafts*. Kyiv: KMUGA, 2000. 460 p.
6. Хохлов Е.М. Анализ границ применения факторных процедур ИКАО и перспективы развития новых процедур при обеспечении безопасности труда авиаспециалистов комплексным анализом процессов. Проблемы охраны труда и окружающей среды: Сб. науч. трудов / Хохлов Е.М. — Киев, 1986. С. 16–21.
Khokhlov E.M. Analysis of scopes of application of factor procedures of ICAO and prospects of development of new procedures at providing of occupational safety of aviation specialists by complex analysis of processes. *Problems of occupational and environment safety*. Kyiv, 1986. pp.16–21.
7. Хохлов Е.М. Законы факторных переходов при прогнозировании и предотвращению маловероятных аварийных непроектных процессов. Проблемы охраны труда: Сб. науч. трудов. / Е.М. Хохлов — Киев, 1993. С. 34–39.
Khokhlov E.M. Laws of factor transitions at prognostication and prevention of improbable emergency unproject processes. *Problems of occupational safety*. Kyiv, 1993. pp. 34–39.

Получено 23.05.2013