

УДК 656.7.08(477):519.25:004(045)

Холявкіна Т.В.,
Сукач О.М.**СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ДАНИХ ПРО ПОКАЗНИКИ
БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН УКРАЇНИ****Інститут комп'ютерних технологій
Національного авіаційного університету**

Розглянута задача регулярного контролю рівня безпеки польотів АТС України та особливостей статистичної обробки даних про події в цивільній авіації. Розроблені методи та алгоритми обчислення статистичних показників та їх довірчих меж. Запропоновані методи підвищення вірогідності обчислення оцінок із урахуванням регіональних особливостей парку та умов експлуатації повітряних суден України

Введення

У відповідності до Концепції Державної цільової програми безпеки польотів виникає необхідність розробки методів статистичної обробки даних про показники безпеки польотів для вирішення задач регулярного контролю, моніторингу та управління ризиками при експлуатації ПС. Для оцінки стану безпеки польотів (БП) використовують інформацію, отриману від експлуатанта повітряних суден

(ПС) у вигляді звітів про наліт та кількість небезпечних ситуацій, які виникли під час виконання польотів, по категоріям безпеки за звітний період.

Припустимо, маємо звітну інформацію щодо БП за період шість років за результатами аналізу польотних даних табл. 1. Наведена інформація орієнтовно відповідає по нальоту та кількості авіаційних подій в цивільній авіації України.

Таблиця 1. Звітні дані щодо БП

Рік	Наліт	Катастрофи	Аварії	Серйозні інциденти
1	132485	2	0	5
2	164891	1	1	4
3	184770	1	1	7
4	188698	0	0	5
5	203356	1	1	13
6	231652	0	0	8
Загалом:	1105852	5	3	42

Постановка задачі

Необхідно визначити:

- оцінку математичного очікування (генерального середнього) для заданої сукупності значень випадкової величини x_i ;
- оцінку середнього квадратичного відхилення генеральної сукупності;
- довірчі межі для генерального середнього;
- довірчі межі середнього квадратичного відхилення генеральної сукупності.

Закон розподілу генеральної сукупності подій ризику можна априорі вважати

близьким до нормального, оскільки ризики створюються безліччю чинників, вплив яких на створення генеральної сукупності приблизно однаковий.

Потік подій є пуассоновським, тобто ординарним без наслідку, в якому імовірність виникнення події не залежить від попередньої історії.

Нормальний розподіл виникає в результаті дії великого числа випадкових чинників. Це складає зміст центральної граничної теореми теорії імовірності.

Оскільки використовуються дані щодо нальоту ПС тільки за період шість

років, а такі події, як катастрофи є явище, яке виникає навіть не кожного року, при цьому наліт за рік відрізняється в 1,3-1,7 разів, доцільно для визначення показників БП використовувати згладжені значення нальоту та подій, які сталися під час експлуатації ПС. Згладження будемо проводити за алгоритмом Тьюки [2]. Суть алгоритму Тьюки полягає в тому, що незгладжені значення випадкової величини групуються по N значень. Наприклад, як що маємо ряд $X_1; X_2; X_3...X_n$, то при об'єднанні по N за алгоритмом Тьюки отримуємо новий ряд значень $Y_1; Y_2; Y_3...Y_m$, де $Y_1=X_1+X_2+X_3+...+X_N$, $Y_2=X_2+X_3+X_4+...+X_{N+1}$ і так далі.

Розрахуємо згладженні значення нальоту, та показників БП за алгоритмом Тьюки, згрупувавши дані по три роки, нормовані показники безпеки за формулою (1) для незгладжених та згладжених даних та запишемо їх у табл. 2.

$$x_i = \frac{x_{i\text{табл.}}}{t_{i\text{табл.}}} \times 100000, \quad (1)$$

де $x_{i\text{табл.}}$ – кількість подій в звіті експлуатанта;

$t_{i\text{табл.}}$ – наліт ПС експлуатанта, відповідний $x_{i\text{табл.}}$ подій;

x_i – кількість подій, приведена до нальоту, рівному 100000 год.

Нормовані дані щодо безпеки польотів зведені у табл. 2.

Визначення оцінки математичного очікування (генерального середнього) випадкової величини x

В математичній статистиці оцінка математичного очікування визначається за формулою $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i$. Оскільки в на-

шому випадку випадковою величиною є оцінка небезпечної ситуації приведена до 100000 годин нальоту, а сам нальот по роках суттєво відрізняється, то генеральне середнє приведених оцінок визначаємо за формулою (1). Визначимо оцінку математичного очікування для кожної категорії небезпеки для вихідних та згладжених даних (табл. 3).

Оцінка дисперсії σ^2 та середнього квадратичного відхилення (СКВ) σ генеральної сукупності.

Оцінка дисперсії σ^2 генеральної сукупності при невідомому математичному очікуванні a генеральній сукупності визначається за формулою:

$$S_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2)$$

Оцінка середнього квадратичного відхилення σ генеральної сукупності визначається за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

Оцінка S є зміщеною для будь-якого закону розподілу (для нормального закону ця оцінка є спроможною і асимптотично ефективною).

Незміщена оцінка для нормального закону розподілу визначається за формулою:

$$S_1 = M_k \cdot S_n, \quad (4)$$

$$M_k = \sqrt{\frac{k}{2} \frac{\Gamma(k/2)}{\Gamma(\frac{k+1}{2})}},$$

де $\Gamma(y)$ – гамма функція; $k=n-1$.

Зазвичай $M_k = f(k)$ задається таблично (табл. 7) і для $k > 60$ $M_k \approx 1$.

Визначимо оцінки дисперсії, середнього квадратичного відхилення та незміщеної оцінки середнього квадратичного відхилення за формулами (2), (3), (4) відповідно для кожної категорії небезпеки для вихідних та згладжених даних. Результати розрахунків зведені у табл. 5.

Таблиця 2. Нормовані дані щодо БП

Рік	Налт	Налт по Тьюки	КАТАСТРОФИ					АВАРІЇ					СЕРИОЗНІ ІНЦИДЕНТИ				
			N _к	K _к	N _{к.т}	K _{к.т}	N _а	K _а	N _{а.т}	K _{а.т}	N _{сі}	K _{сі}	N _{сі.т}	K _{сі.т}			
2	132485	-	2	1,5096	-	-	0	0,0000	-	-	-	5	3,7740	-	-		
3	164891	-	1	0,6065	-	-	1	0,6065	-	-	-	4	2,4258	-	-		
4	184770	482146	1	0,5412	4	0,8296	1	0,5412	2	0,4148	7	3,7885	16	3,3185			
5	188698	538359	0	0,0000	2	0,3715	0	0,0000	2	0,3715	5	2,6497	16	2,9720			
6	203356	576824	1	0,4917	2	0,3467	1	0,4917	2	0,3467	13	6,3927	25	4,3341			
7	231652	623706	0	0,0000	1	0,1603	0	0,0000	1	0,1603	8	3,4535	26	4,1686			
Загало М	1105852	2221035	5	0,4521	9	0,4052	3	0,2713	7	0,3152	42	3,7980	83	3,7370			

Позначки у таблицях:

N_к - кількість катастроф;

K_к - приведена кількість катастроф на 100000 годин нальоту;

N_{к.т} - кількість катастроф згладжена по Тьюки;

K_{к.т} - приведена кількість катастроф на 100000 годин нальоту по Тьюки;

N_а - кількість аварій;

K_а - приведена кількість аварій на 100000 годин нальоту;

N_{а.т} - кількість аварій згладжена по Тьюки;

K_{а.т} - приведена кількість аварій на 100000 годин нальоту по Тьюки;

N_{сі} - кількість серйозних інцидентів;

K_{сі} - приведена кількість серйозних інцидентів на 100000 годин нальоту;

N_{сі.т} - кількість серйозних інцидентів згладжена по Тьюки;

K_{сі.т} - приведена кількість серйозних інцидентів на 100000 годин нальоту по Тьюки.

Таблиця 3. Оцінки математичного очікування

	КАТАСТРОФИ		АВАРІЇ		СЕРІОЗНІ ІНЦИДЕНТИ	
	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені
X	0,4521	0,4052	0,2713	0,3152	3,7980	3,7370

Таблиця 4. Значення коефіцієнта M_k в залежності від k

k	M_k	K	M_k	k	M_k	K	M_k
1	1,253	8	1,032	15	1,017	30	1,008
2	1,128	9	1,028	16	1,016	35	1,007
3	1,085	10	1,025	17	1,015	40	1,006
4	1,064	11	1,023	18	1,014	45	1,006
5	1,051	12	1,021	19	1,013	50	1,005
6	1,042	13	1,019	20	1,013	60	1,004
7	1,036	14	1,018	25	1,010	>60	≈1

Таблиця 5. Оцінки дисперсії та СКВ

	КАТАСТРОФИ		АВАРІЇ		СЕРІОЗНІ ІНЦИДЕНТИ	
	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені
S_1^2	0,312082	0,081549	0,090919	0,012691	2,010661	0,434395
S	0,558643	0,285569	0,301528	0,112653	1,417978	0,659086
S_1	0,587134	0,309842	0,316906	0,122229	1,490295	0,715109

Визначення довірчих меж для генерального середнього

Задаємо значення односторонньої довірчої ймовірності γ_n та γ_b , відповідно для нижньої та верхньої довірчої межі. Для подій в авіації зазвичай задається довірча ймовірність $\gamma_1=0,9$ або $\gamma_2=0,95$.

Нижня довірча межа a_n та верхня довірча межа a_b для генерального середнього обчислюються за формулами:

$$a_n = \bar{x} - \frac{t_{\gamma_n} S_1}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

$$a_b = \bar{x} + \frac{t_{\gamma_b} S_1}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

де \bar{x} – оцінка генерального середнього; S_1 – незміщена оцінка середнього квадратичного відхилення;

t_γ – квантиль розподілу Стьюдента (розподілу).

Вибіркові оцінки генерального середнього і його середнього квадратичного відхилення визначені та занесені у таблиці 3 і 5.

Квантиль розподілу Стьюдента (t_γ) визначається по таблиці 6 для заданих значень γ та $k=n-1$, де n – кількість спостережень. Для наших даних $n=6$, відповідно $k=5$.

Таблиця 6. Квантилі розподілу Стьюдента (t -розподілу)

$P(t_\gamma)$	Кількість ступенів свободи k									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,90	3,078	1,886	1,638	1,533	1,476	1,440	1,415	1,397	1,383	1,372
0,95	6,314	2,920	2,353	2,132	2,015	1,943	1,895	1,860	1,833	1,812

Розрахуємо довірчі межі за формулами (5) та (6) для довірчих ймовірностей $\gamma_{n1}=\gamma_{b1}=0,9$ (a_{n1} , a_{b1}) та $\gamma_{n2}=\gamma_{b2}=0,95$ (a_{n2} ,

a_{b2}) для подій при виконанні польотів, та запишемо розраховані данні у табл. 7.

Таблиця 7. Довірчі межі генерального середнього

	КАТАСТРОФИ		АВАРІЇ		СЕРІОЗНІ ІНЦИДЕНТИ	
	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені
α_{H1}	0,0983	0,1515	0,0803	0,2151	2,9000	3,1513
α_{E1}	0,8059	0,6590	0,4622	0,4153	4,6960	4,3227
α_{H2}	-,0308	0,0407	0,0106	0,1714	2,5720	2,8957
α_{E2}	0,9812	0,7697	0,5320	0,4590	5,0239	4,5783

Таким чином, довірчі межі параметру розподілу x для довірчих ймовірностей $\gamma_{H1}=\gamma_{E1}=0,9$ та $\gamma_{H2}=\gamma_{E2}=0,95$ утворюють

довірчі інтервали для генерального середнього, які запишемо у табл. 8.

Таблиця 8. Довірчі інтервали для генерального середнього: $\gamma_1=0,90$, $\gamma_2=0,95$

КАТАСТРОФИ		АВАРІЇ		СЕРІОЗНІ ІНЦИДЕНТИ	
незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені	незгладжені	згладжені
$0,10 \leq x \leq 0,81$	$0,15 \leq x \leq 0,66$	$0,08 \leq x \leq 0,46$	$0,22 \leq x \leq 0,42$	$2,90 \leq x \leq 4,70$	$3,15 \leq x \leq 4,32$
$0,03 \leq x \leq 0,98$	$0,04 \leq x \leq 0,77$	$0,11 \leq x \leq 0,53$	$0,17 \leq x \leq 0,46$	$2,57 \leq x \leq 5,02$	$2,90 \leq x \leq 4,58$

Порівняльний аналіз результатів обчислення оцінок показників безпеки

Згідно SARPS ІКАО, авіаційна адміністрація встановлює значення прийнятного рівня безпеки польотів для галузі і задані рівні для видів робіт і перевезень, які виконуються. Орієнтирами при завданні цих рівнів повинні служити середні значення показників, досягнуті державами-членами ІКАО, значення показників, що реалізувалися в авіації держав регіону, а також значення, що реалізувалися в АТС держави.

ІКАО [1], як приклад, при розробці програми з безпеки польотів і проактивної системи управління безпекою рекомендує використовувати значення заданого рівня безпеки польотів при експлуатації ПС $K_{АП}=0,5$ авіаційних подій з людськими жертвами на 100 тисяч годин польотного часу зі зменшенням значення цього коефіцієнта на 40% протягом п'яти років і $K_I=50 \times 10^{-5}$ серйозних інцидентів на годину польоту зі зниженням на 25% протягом трьох років.

Аналіз офіційних статистичних даних про безпеку польотів цивільних ПС в Україні і в державах СНД дозволяє вважати, що такі значення показників безпеки в основному відповідають досягнутому рівню БП при виконанні комерційних перевезень літаками 1-3 класів.

Так, за даними МАК [4], за п'ятирічний період (з 2002 по 2007 рік) по парку ПС СНД 1-3 класів, які виконують комерційні перевезення, $K_{АП}=0,248$; $K_K=0,142$; а по парку ПС України – відповідно $K_{АП}=0,72$; $K_K=0,452$.

По всьому парку ПС (без авіацій загального призначення) в державах СНД $K_{АП}=1,19$ (в Україні – $K_{АП}=2,04$); $K_K=0,478$ (в Україні $K_K=0,76$).

Однією із звітних форм ІКАО є коефіцієнт АП з ПС, що мають сертифіковану максимальну злітну вагу понад 2250 кг при виконанні регулярних повітряних перевезень, які супроводжуються загибеллю пасажирів. В середньому по ІКАО $K_K=0,025 \times 10^{-5}$, а по СНД $K_{КСНД}=0,087 \times 10^{-5}$, $K_{АПСНД}=0,183 \times 10^{-5}$.

По Україні такі оцінки отримати не можливо у зв'язку з відсутністю офіційних відомостей про час нальоту ПС при виконанні регулярних повітряних перевезень.

З цієї ж причини викликає сумнів доброякісність аналогічних оцінок по СНД.

Як впливає з приведених вище розрахунків довірчі значення показників БП мають великий розкид при односторонній довірчій ймовірності 0,9 і, тим більше, 0,95, як це прийнято в авіації. Це свідчить про нерепрезентативність множини спостережень несприятливих для

експлуатації ПС подій (тобто про малий об'єм вибірки). Так, наприклад, середньому значенню $K_K=0,452 \times 10^{-5}$ відповідає наліт 1,1 млн. годин, тобто в середньому менше 5 катастроф за весь період спостережень і максимальне довірче значення $K_{K_{\max}}=0,81 \times 10^{-5}$, що реалізувалося, при односторонній довірчій ймовірності $P_d=0,95$. Якщо об'єм вибірки збільшити в 6-7 разів, то зазначеному середньому значенню K_K відповідатиме довірче значення $K_{K_{\max}}=0,55 \times 10^{-5}$.

Отже, високий рівень довірчої ймовірності для значень $K=0,5 \times 10^{-5}$ може бути забезпечений тільки при об'ємі вибірки, відповідної 6-8 млн. годин нальоту.

Можливою альтернативою для цілей регулярного контролю рівня безпеки польотів по АТС України може служити використання заданих рівнів аварій і серйозних інцидентів зі збереженням термінальної оцінки безпеки по величині K_K .

Для оцінки тенденцій зміни рівня БП [3] за результатами обробки нерепрезентативної множини спостережень можна використовувати метод згладжування з одночасним штучним збільшенням об'єму вибірки, наприклад, метод Тьюки. При використанні цього методу, середнє значення показників безпеки змінюються незначно (табл. 2), але, в результаті згладжування викидів, з'являється можливість апроксимації результатів обробки експонентою або іншою гладкою кривою, що проходить через точки, відповідні дискретним часовим інтервалам.

По характеру апроксимуючих кривих можна судити про тенденції якісної зміни показників безпеки.

Аналіз причин і чинників небезпеки для експлуатації ПС за даними ІКАО

У основу програми по безпеці польотів покладені результати вивчення загальних закономірностей і окремих особливостей впливу різних небезпечних

для експлуатації чинників і причин їх виникнення.

За даними ІКАО, причинами більшості авіаційних подій є відмови життєво важливих систем ПС (ВТ), відхилення в діях екіпажа ПС (ВЕ), відхилення при аеродромному забезпеченні польотів і ОПР (ЗП) і несприятливі умови (НУ) польотів. Питома вага вказаних небезпечних чинників на безпеку польотів протягом останніх десятиліть практично не змінюється і складає: ВТ – 15÷20%; ВЕ – 60÷70%; ЗП – 8÷12%; НУ – 7÷10%.

У циркулярах ІКАО по людському чиннику, а також в матеріалах вітчизняних і зарубіжних авіаційних фахівців наводяться дані про розподіл авіаційних подій з людськими жертвами між різними етапами польоту.

Кількість подій на етапі польоту знаходиться в прямій залежності від рівня психофізичної напруженості членів екіпажа ПС (відповідно до закону Йеркса-Додсона). Тому при заході на посадку і посадці, коли напруженість екіпажа близька до фізіологічної межі і може його перевищити в особливих випадках польоту, відбувається максимальна кількість авіаційних подій.

У табл. 9 наведені розподіли авіаційних подій на окремих етапах півторогодинного польоту з вказівкою тривалості етапу, а також градаційні оцінки розподілу ризику авіаційних подій між етапами польоту. Оцінки ризику обчислювалися за формулою:

$$\bar{K}_{Ri} = \frac{K_{Ri}}{\sum K_R},$$

де K_{Ri} – відношення відсотка авіаційних подій на i -м етапі польоту до тривалості цього етапу у відсотках від часу польоту; $\sum K_R$ – сумарне значення оцінок ризику за весь час польоту.

Таблиця 9. Розподіл авіаційних подій по етапам польоту

№ п/п	Найменування етапу	Час польоту		Кількість АП, %	$K_{АП}$	$\bar{K}_{АП}$
		t , мін.	\bar{t} , %			
1	Зліт	1	1,11	12,05	10,856	0,2
2	Початковий набір висоти	1	1,11	7,23	6,513	0,12
3	Набір висоти	12	13,33	6,07	0,455	0,01
4	Ешелон	51	56,67	13,17	0,232	0,005
5	Зниження	10	11,1	5,78	0,521	0,01
6	Початок заходу на посадку	11	12,2	6,55	0,537	0,01
7	Захід на посадку	3	3,33	17,54	5,267	0,1
8	Посадка	1	1,11	31,67	28,48	0,54
9	Всього	90	100	100	52,86	1,0

З таблиці виходить, що ризик максимальний при зльоті, початковому наборі висоти, заході на посадку та посадці.

На цих етапах, окрім чинника максимальної психофізіологічної напруженості, в найбільшій мірі виявляється вплив чинників ВТ та НУ.

Як впливає з аналізу статистичних даних, в Україні відбувається 8-9% авіаційних подій, 11-12% катастроф та гине 17-18% пасажирів щодо загальних показників аварійності в цивільній авіації держав СНД.

Це викликає необхідність щодо вживання кардинальних заходів з метою запобігання АП та забезпечення БП. Тому створення та реалізація концепції Державної програми безпеки польотів та власно програми відповідно до вимог SARPS ІКАО та РУБП є необхідними діями держави з метою досягнення сучасного рівня безпеки експлуатації ПС.

Висновки

Рівень авіаційних перевезень в Україні, незважаючи на постійний ріст, не забезпечує репрезентативної множини даних для обчислення показників безпеки польотів ПС. Високий рівень довірчої ймовірності може бути забезпечений при значно більшій множині вибірки.

Для підвищення вірогідності та оцінки тенденцій зміни рівня безпеки польотів доцільно застосовувати методи згла-

джування з одночасним штучним збільшення об'єму вибірки, наприклад метод Тьюки. Використання цього методу дозволяє при незначній зміні середніх значень показників в результаті згладжування викидів апроксимувати результати та судити про тенденції зміни показників безпеки польотів.

Список літератури

1. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Док. 9859 AN/460.
2. Хейфциц М.И. Обработка результатов испытаний. – М.: Машиностроение, 1998. – 168 с.
3. Шишкин В.Г. Безопасность полетов и бортовые информационные системы. – Иваново: 2005. – 34 с.
4. Состояние безопасности полетов в ГА государств-участников "Соглашения о ГА и об использовании воздушного пространства". Доклад МАК. – М.: МАК, 2008. – 680 с.