

Статистически анализ на отказите в системите на въздухоплавателно средство по данни от средствата за обективен контрол

Резюме:

Демонстрирано е приложение на статистически модел за намиране на количествени надеждностни характеристики на системи на въздухоплавателно средство чрез използване на реални опитни данни за отказите в системите, събирани в специално разработена информационна система в процес на експлоатация конкретно въздухоплавателно средство за период от 6 месеца от бордните средства за обективен контрол.

1. Въведение

За изчисление на надеждността на самолетна система се използват както данни въведени от обслужващия персонал по време на периодичното и оперативното техническо обслужване на въздухоплавателното средство в специално разработена информационна система [1], така и разчетени данни от бордните средства за обективен контрол (т.нар. „черни кутии“) [2]. Събраните данни за определен период от време се подлагат на статистически анализ с цел намиране на количествените характеристики, които да бъдат използвани при пресмятането на на-

деждността на разглежданата система, чрез определяне на вероятността на отказ.

При изчисленията се прилага емпиричен (на базата на опитно установени данни) модел, в който се разглежда единичен самолет от целия авиационен парк на оператора, поради факта, че всяка машина е строго индивидуална, както колите които излизат от поточната линия - всяка си има свои капризи и тенденция към отказ, въпреки че са произведени в еднакви условия. Това се обяснява със сложността на вградените системи и изграждащите ги компоненти, които могат да бъдат от различни партии, както и от разлики при експлоатацията и обслужването.

При експериментално оценяване на надеждността, при което се използват реални опитни данни, основно се оценяват два вида показатели:

характеризиращи **вероятност** (напр. изправно състояние в произволен момент) – при тях се взема броят реализации на случайните величини от опитните данни - напр. брой откази.

характеризиращи **времето за работа** (средно време между отказите, наработка до отказ и други) – при тях се работи с интервали от време – напр. време между две реализации на наблюдаваните величини (откази), и др.

Вариантите на практическите задачи при експериментално оценяване зависят от априорните сведения за закона на разпределние на разглежданите величини:

при **известен** закон на разпределние целта на статистическата обработка на данните е получаване на оценки за показателите на надеждност на база вида на закона за разпределние и неговите характеристики;

при **неизвестен** закон на разпределние се прави предположение (хипотеза) за вида му, на база експертен анализ на процесите (основно предишен опит) и чрез статистически методи се проверява за противоречие на опитните данни с конструираната хипотеза и характеристиките на предположения вид на за закона на разпределние.

За неизвестните параметри на надеждността могат да бъдат направени точкови или интервални оценки.

Методите за точкови оценки на параметрите на надеждност биват два

вида: **аналитични** и **графически**. При малък обем на статистическите данни, ниска степен на достоверност и липса на априорни сведения за закона на разпределение на случайната величина се използват графическите методи. Пример за приложение на тези методи е при разследване на произшествие, когато се анализират данни за няколко секунди или минути от полета, представени графично при разчитане на данните от СОК.

При аналитичните методи за точкови оценки се въвеждат критерии за качество на оценките на изследвания параметър:

оценката да клони (по вероятност) към истинската стойност с увеличаване на обема от извадката т.е. да е **състоятелна**;

ако математическото очакване е равно на истинската стойност (т.е. липсва систематична грешка) – оценката е **неизместена**;

оценката да притежава най-малка дисперсия в сравнение с други неизместени оценки т.е. от две състоятелни и неизменни оценки, **ефективна** е тази с по-малка дисперсия.

2. Обзор на най-често прилаганите методи

От аналитичните методи два са универсални и се използват най-често при статистически анализ на експериментални данни за оценка на надеждността: **метод на Пирсън** (метод на моментите) и **метод на Фишер** (метод на най-голямо правдоподобие).

Методът на Пирсън се основава на факта, че ако броят на отказите е достатъчно голям, то по закона за големите числа стойностите на емпиричните (опитните) моменти са близки до теоретичните, т.е. параметрите на теоретичното разпределение се определят от условието за равенство между моментите на теоретичното и статистическото (опитното) разпределение. Предимство на метода е простотата при практическо ползване. Недостатък, е че този метод се прилага за извадка с не по-малък обем от 30, и получените оценки обикновено са изместени и малко ефективни. Това не важи при нормален закон на разпределение, при който методът дава ефективни и състоятелни оценки.

При метода на Фишер се съставя функция, която изразява максималната вероятност да се получи реализирания в опитите резултат – т.нар. функция на правдоподобие. Стойностите на пара-

метрите, които максимизират функцията на правдоподобие са търсените точкови оценки. Предимство на метода е, че дава състоятелни и ефективни (ако има такива) оценки. Недостатък е, че понякога оценките са изместени. Изместването се намалява, като се увеличи обемът на извадката.

В случая при използване на данни от СОК натрупани в продължение на произволен интервал време – няма априорни сведения за вида на функцията на разпределение, което налага използването на метод за изчислителна надеждност с изработването на хипотеза за вида и характеристиките на закона на разпределение.

3. Опитна постановка

Състоянието на обект се характеризира с 2 състояния (**изправно** и **неизправно** (отказ)), следователно променливата x е количествена (може да се измери) и може да приема следните 2 дискретни стойности: 0 (изправно състояние) или 1 (неизправно състояние - т.нар. **диагностично събитие**)).

За самолет (възстановим обект) СОК са регистрирали $N = 5$ отказа за време $P = 459$ часа, съответно на $T_i = 57, 180,$

378, 396 и 414-ия час в системата за определяне на височина близо до земята (ATA 34-40: Radio Altimeter Fault).

Забележка: Използваните данните са реални и са натрупани в продължение на 6 месеца от експлоатацията на самолета от фамилията Airbus A320 на авиационен оператор извършващ търговски полети.

Приемам, че:

отказите **не са взаимосвързани**, т.е. няма зависимост между времето на наработка между отказите (след отстраняването на всеки отказ обектът се счита за напълно работоспособен); отказите са **независими**, т.е. не се отчита евентуално влияние на външни фактори (откази в други системи).

4. Приложение на метода за максимално правдоподобие за намиране и проверка на надеждностните показатели по данни от експеримента

За целите на настоящата работа ще демонстрирам приложение на метода на максималното правдоподобие (Фишер) в съчетание с критерия χ^2 (хи-квадрат), които са се наложили като най-често използвани в практиката. [3]

1) Изчислява се наработката до отказ (TBF - Time Before Failure) t_i :

i	t_i ч
1	57
2	123
3	198
4	18
5	18

Таблица 4.1 Време на работа между отказите

2) Изчислява се средата (очаквана стойност – sample mean) \bar{y} :

$$(4.1) \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i =$$

$$(57+123+198+18+18)/5 = 82.8 \text{ часа}$$

Средата за цялата популация (population mean) е:

$$(4.2) \mu = \frac{P}{n} = 459/5 = 91.8 \text{ часа}$$

3) За удобство се въвежда безмерната величина x_i :

$$(4.3) x_i = \frac{t_i}{\bar{y}}$$

i	t_i	x_i
1	57	0.688406
2	123	1.485507
3	198	2.391304
4	18	0.217391
5	18	0.217391

Таблица 4.2 Стойност на x_i

4) Определят се броят интервали на групиране K и размерът на интервала Δ_i :

$$(4.4) \quad x_{\min} = 0.217391, \quad x_{\max} = 2.391304$$

$$(4.5) \quad \Delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \lg n} = 0.657446,$$

приемам стойност $\Delta = 0.6$

$$(4.6) \quad K = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta} = 3.623188, \text{ избирам } K = 4$$

Следователно един период е с интервал:

$$(4.7) \quad \Delta_i = \frac{P}{K} = 459/4 = 114.75 \text{ часа, приемам стойност } \Delta_i = 114 \text{ часа.}$$

5) Пресмятат се броят случайни реализации m_i във всеки интервал $i = 1, 2, \dots, K$, като се изчислява вероятността (честотата) за попадане на времето на без-

отказна работа в i -тия интервал $\bar{f}_i(x)$:

K	Δ_i	m_i
1	0-114	1
2	115-229	1
3	230-344	0
4	345-459	3

Таблица 4.3 Брой реализации във всеки интервал на групиране

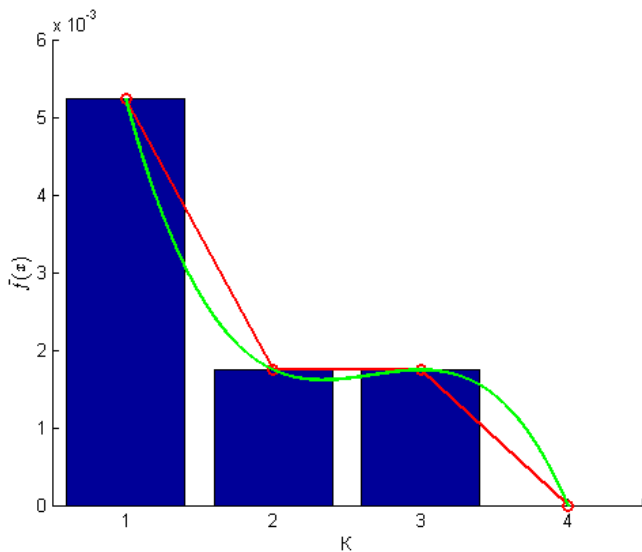
Поддържа се броят на реализациите във вариационен ред за пресмятане на вероятността за попадане на времето за безотказна работа в съответния интервал:

$$(4.8) \quad \bar{f}_i(x) = \frac{m_i}{n \cdot \Delta_i}$$

K	m_i	$\bar{f}_i(x)$
1	3	0.005229
2	1	0.001743
3	1	0.001743
4	0	0

Таблица 4.4 Вероятност за попадане на времето за безотказна работа в i -тия интервал

6) Построява се хистограма с вероятностите за определяне на вида на разпределението



Фигура 4.1 Хистограма с вероятностите за попадане на времето за безотказна работа

Начупената червена линия, свързваща средите, дава представа за формата на кривата $f_i(x)$. На фигурата след интерполация, формата на $f_i(x)$ е изобразена със зелена линия.

По вида на начупената линия може да се предположи, че функцията $f(x)$ е намаляваща експонента, т.е. вероятността на безотказна работа е разпределена по **експоненциален закон**. [4]

$$(4.9) f(x) = e^{-x}, x = \frac{t}{T_0} \approx \frac{t}{\mu}$$

Това твърдение е подкрепено от теорията на надеждността, според която по експоненциален закон е разпределено времето на безотказна работа при **внеапни откази** (период на интензивна експлоатация на изследвания обект – оперативен етап) и наработката не влияе на надеждността. Това свойство, че бъдещето на процеса не зависи от неговото минало, е валидно само за експоненциалното разпределение. [5]

7) Проверка на $f(x)$ за съгласие с опитните данни:

7.1) Статистически оценки

Пресмята се вариацията (дисперсията), след намиране на отклоненията от средата:

i	$\Delta_{\bar{y}} = t_i - \bar{y}$	$\Delta_{\bar{y}}^2$
1	-25.8	665.64
2	40.2	1616.04
3	115.2	13271.04
4	-64.8	4199.04
5	-64.8	4199.04

Таблица 4.5 Отклонение от средата

(4.10) Вариация:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum \Delta_{\bar{y}}^2 = 4790.16$$

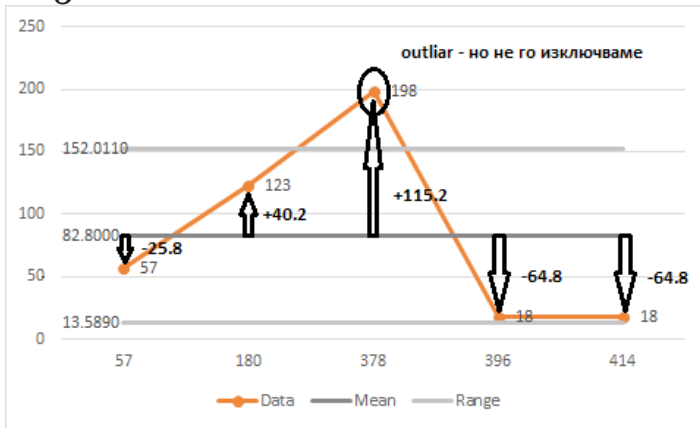
(4.11) Стандартно отклонение:

$$\bar{S} = \sqrt{S^2} = 69.21098 \text{ часа}$$

(4.12) Граници:

$$P_{\min} = \bar{y} - \bar{S} = 82.8 - 69.21098 = 13.589 \text{ часа}$$

$$P_{\max} = \bar{y} + \bar{S} = 82.8 + 69.21098 = 152.011 \text{ часа}$$



Фигура 4.2 Отклонения на времето на наработка до отказ спрямо средното време на отказ

7.2) Намиране на χ^2

Подрежда се броят на реализациите във вариационен ред и се пресмятат очакваната и реалната вероятности за възникване на отказ за съответния интервал спрямо приетия закон на разпределение:

Таблица 4.6 Реална и очаквана вероятности за възникване на отказ спрямо приетия закон на разпределение

$$(4.13) \chi^2 = 0.84893$$

K	m_i	P_i^* реална	P_i очаквана	$n.P_i$	$(m_i - n.P_i)^2$	$\chi^2 = \frac{(m_i - n.P_i)^2}{n.P_i}$
1	3	0.6	0.63	3.15	0.0225	0.007143
2	1	0.2	0.23	1.15	0.0225	0.019565
3	1	0.2	0.09	0.45	0.3025	0.672222
4	0	0	0.03	0.15	0.0225	0.15
$\Sigma =$	5	1	0.98			0.84893

7.3) Дефиниране на хипотези спрямо средното време на отказ

(4.14) Нулева хипотеза $H_0: \bar{y} = 82.8$ часа, т.е. системата ще работи поне 82.8 часа преди да настъпи отказ.

(4.15) Алтернативна хипотеза $H_a: \bar{y} < 82.8$ часа

7.4) Проверка за приемане/отхвърляне на нулева хипотеза

(4.16) Степени на свобода: $f = 5 - 1 = 4$

(4.17) Критична стойност: $\mathcal{C} = \chi^2 = 0.84893$

(4.18) Ниво на достоверност (вероятност): $\alpha = 90\%$

От таблица с вероятности за избрания критерий се определя вероятността:

(4.19) $P(\chi^2 \leq \mathcal{C}) = 0.95 \div 0.90$ т.е. между 90% и 95%.

Следователно H_0 се приема.

5. Бъдещи приложения и разработки

След като чрез статистическия анализ са установени количествените надеждности характеристики може да бъде направен вероятностен анализ. Цели-

те на този анализ са намиране на вероятности за настъпване на отказ след определен интервал от време спрямо предишен отказ.

Тези данни са изключително ценни за инженерите, които ги използват за планиране на техническото обслужване и снабдяването с материали на обслужващия персонал. Това е сериозна предпоставка за намаляване на времето на престой на земя (ground time) на въздухоплователното средство, което води до увеличаване на печалбата от неговата експлоатация за търговски полети.

6. Заключение

Дялът на транспортирани пътници и товари по въздух е в подем, което определя някои от основните цели пред авиационната индустрия – увеличаване на безопасността на полетите и намаляване на експлоатационните разходи.

Чрез прилагане на изчислителни методи за решаване на инженерни задачи, използвайки ефективното натрупване на данни в специално разработени системи се облекчават ежедневните дейности на авиационния персонал свързани с планирането, експлоатацията и

обслужването на техниката. Предвид факта, че над 80% от причините за настъпване на авиационно произшествие са поради човешка грешка, трябва да се наблегне върху намаляване на влиянието ѝ. С напредъка на технологиите се разширяват възможностите за оптимизиране на сложните процеси, които участват в динамичната среда по превозването на хора и товари за максимално кратко време на различни разстояния. Осигуряването на материали по предварителни разчети би намалило както натоварването върху обслужващия персонал, така и разходите на АО за поддръжка на техниката, чрез подобряване на качеството и намаляване на времето за отстраняване на възникнал отказ. Това е сигурен път за увеличаване на безопасността на полетите, в частта която зависи от техническото състояние на експлоатирани самолети.

Ключова роля трябва да бъде отредена на човека, с подходяща професионална подготовка, който да дефинира условията и избора на метод за съответните изчисления при използване на големия обем натрупана информация и последваща интерпретация на резултатите.

Източници:

- [1] Монов И., Събиране и използване на данни за прогнозиране на надеждност на оборудването на въздухоплавателно средство, БулТранс, 2013.
- [2] Монов И., Алгоритъм и приложения програма за разчитане на запис от бордните средства за обективен контрол на самолет (Flight Data Management System (FDMS)), ТУ-София, София, 2011.
- [3] Montgomery, D., "Design and Analysis of Experiments", 7th Edition, John Wiley and Sons Inc., 2009.
- [4] Yoe, C., "Choosing a Probability Distribution", Institute for Water Resources, 2010.
- [5] Гиндев, Е., "Надеждност на авиационната електронна техника", Технически университет - София, 1998.

*Автор: инж. Иван Монов
Инженер по авиационно електронно
оборудване (авионикс), Програмист
приложения, Application Software
Systems Ltd., София, България
ivanmonov@yahoo.com*