ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ТЕХНИЧЕСКОТО ОБСЛУЖВАНЕ НА АВИАЦИОННИТЕ РАДИОЕЛЕКТРОННИ СИСТЕМИ

Георги Сотиров

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: spsbyte@space.bas.bg

Ключови думи: *продължителна експлоатация, авиационни радиоелектронни системи, самолети, вертолети*

Резюме: *При продължителната експлоатация на самолети и вертолети съществуват сериозни трудности при решаване на задачата за оптимален избор и изпълнение на сроковете за профилактика на всяка подсистема в детерминирана постановка и в случай на голямо количество на подсистеми. Това в значителна степен се отнася до серийни образци авиационни радиоелектронни системи, при експлоатацията на които възникват редица трудности, свързани с ниското ниво на технологично съвършенство на елементната база и блоковата структура.*

RESEARCH ON THE POSSIBILITIES OF IMPROVING THE MAINTENANCE OF AVIATION RADIO ELECTRONIC SYSTEMS

Georgi Sotirov

Space Research and Technology Institute **–** *Bulgarian Academy of Sciences*
e-mail: spsbyte@space.bas.bg

Keywords: *continuous operation, aviation-electronic systems, airplanes, helicopters*

Abstract: *With long-term operation of airplanes and helicopters, there are serious difficulties in solving the problem of optimal choice and meeting the deadlines for the prevention of each subsystem in a deterministic setting and in the case of a large number of subsystems. This applies to a large extent to serial samples of aviation radio-electronic systems, during which a number of difficulties arise due to the low level of technological perfection of the element base and the block structure.*

Въведение

В края на миналия век започна техническото и технологично обновяване на българските ВВС, като бяха въведени в експлоатация вертолети Bell 206. В последствие бяха усвоени и във ВВС бяха въведени в летателна експлоатация самолети C 27J Spartan и вертолети AS 532 AL Cougar, а в авиацията на Военноморските сили (ВМС) – вертолети Eurocopter AS532 Panther.

През 2019 г. беше сключен договор с Правителството на САЩ за доставката на 8 бр. самолети F-16 блок 70 (6 бр. едноместни и 2 бр. двуместни). В началото на април 2020 г. беше обявен договорът на ВВС на САЩ за възлагане на производството на самолетите на компанията Lockheed Martin, съгласно който първите два самолета трябва да бъдат доставени в средата на 2023 г., а последните два – през първото тримесечие на 2024 г. След доставката започва тригодишен период на поддръжка на оборудването и системите, който трябва да приключи в началото на 2027 г.

Понастоящем във ВВС, освен посочените по-горе, се намират в летателна експлоатация и самолети МиГ-29 и Су-25, както и вертолети Ми-17 и Ми-24, произведени в Русия през 80-те години на миналото столетие. До постъпване на въоръжение и усвояване на новите самолети, възниква общата задача за поддържане на изправността и профилактичното обслужване на сложните системи, състоящи се от автономни подсистеми, обединени структурно и функционално. Съществуват сериозни трудности при решаване на задачата за оптимален избор и изпълнение на сроковете за профилактика на всяка подсистема в детерминирана постановка и в случай на голямо количество на подсистеми.

Това в значителна степен се отнася до серийни образци авиационни радиоелектронни системи, при експлоатацията на които възникват трудности, свързани с ниското ниво за контрол на обектите за измерване на информационни параметри, сравнително ниска точност на датчиците-преобразователи на информацията за контрол на параметрите и др.

1. Определяне на оптимална периодичността на проверки на авиационни системи

Необходимо е да се изследва и установи оптималната периодичност на пълните проверки в различните режими на резервираните елементи на авиационните системи от радиоелектронно оборудване (РЕО), по време на които отказалите елементи подлежат на задължителна замяна. Като критерий за оптимизация ще бъде използван коефициентът за оперативна готовност. За да бъде решен такъв клас задачи ще бъде използван подход с използване на резултати от теория на възстановяване, вариационни изчисления и в крайна сметка – гладка оптимизация [2,4].

Да разгледаме резервирани еднотипни елементи, обединени конструктивно и функционално (по общото си предназначение), от които в основна (работна) позиция се намират ***m***-елемента (където ***m* < *n***), а (***n* – *m***) елемента се намират в натоварен или в ненатоварен резерв.

При нивото на технологиите, при които са изработени елементите, влизащи в състава на сложните системи, резервираният елемент може да бъде изпълнен като отделен модул, съдържащ и устройство за автоматично включване на резервните елементи на мястото на отказалите основни такива. Ще считаме, че модулът отказва, ако при отсъствието на резервни елементи възниква отказ на поне един от ***m*** основни елементи. При това, модулът може да бъде възстановен чрез замяна на отказалите в него елементи.

По нататък ще се разглежда продължителната експлоатация на резервиран елемент.

Като цяло резервираният елемент притежава монотонно нарастваща във времето интензивност на отказите, то може да бъде изведен израз за коефициента на оперативна готовност на резервиран елемент.

(1) $$p(x,\tau) = \frac{\int_0^{\tau}[1-F(t+x)]dt}{\mu},$$

където ***F(t)*** е функция за разпределение на времето до отказа на резервирания елемент, ***μ*** е математическото очакване за интервала между две замени на резервирания елемент, а ***x*** е зададеното време за оперативна работа на резервирания елемент в системата.

В този случай интервалът ***τ*** се разглежда като наработка на резервирания елемент, след която той подлежи на замяна (ремонт), състоящ се в замяна на отказалите елементи и мероприятия за възстановяване на изправността (например, регулировки на новите вложени елементи и др.).

Поради тази причина

(2) $$\mu = p_0(\tau)T_0 + p_1(\tau)T_1 + \cdots + p_n(\tau)T_n \ ,$$

където $p_i(\tau)$ за $i = \overline{0,n}$ е вероятността към началото на възстановителните работи системата да има ***i*** на брой отказали елементи, а T_i за $i = \overline{0,n}$ е средното време за пълно възстановяване на резервирания елемент при изпълнение на такива работи при условие, че в него има ***i*** на брой отказали елементи.

Очевидно, е че

$$\sum_{i=1}^{n} p_i\,(\tau) = 1.$$

По такъв начин, след заместване на (2) в (1) ще получим, че

(3) $$p(x,\tau) = \frac{\int_0^{\tau}[1-F(t+x)]dt}{p_0(\tau)T_0+p_1(\tau)T_1+\cdots+p_n(\tau)T_n} \ .$$

По нататък, за всеки вид резервиране се определят функциите $p_i(\tau)$ за $i = \overline{0,n}$ и от условието

(4) $\frac{\partial p(x,\tau)}{\partial \tau} = 0$

при съществуването на единствен (или глобален) максимум на функцията $p(x,\tau)$ може да бъде намерен оптимален период на възстановителните работи за всеки тип резервирани елементи.

Резултатите от проведените разчети на величините $\tau_0^{(2)}, \tau_0^{(3)}, \tau_0^{(4)}$ за случаите, когато резервираният елемент се състои от два, три и четири елемента (резерв за ненатоварване), при най-често срещаните [2,5,6] в авиационната практика стойности на $\lambda, \mathrm{T}_0, \mathrm{T}_1, \mathrm{T}_2, \mathrm{T}_3$ и T_4 са представени в Таблица 1.

Таблица 1

№ по ред	***λ***, [отк., час]	Време за възстановителни работи, [час]					Оптимална продължителност за изпълнение на възстановителните работи [час]		
		T₀							
		T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	$\tau_0^{(2)}$	$\tau_0^{(3)}$	$\tau_0^{(4)}$
1.	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	5,21	9,03	13,8
2.	0,02	0,2	0,4	0,8	1,1	1,2	11,9	21,0	28,6
3.	0,01	0,3	0,5	0,9	1,3	1,7	21,7	40,3	60,6
4.	0,004	*0,6*	0,9	1,4	1,9	2,5	50,4	96,8	148,1
5.	0,002	0,8	1,2	2,0	2,6	3,4	87,5	174,6	273,1
6.	0,0012	1,2	1,8	2,6	3,2	4,0	140,8	285,8	460,5
7.	0,001	1.3	2,0	2,8	3,4	4,2	163,2	334,7	545,6
8.	0,00084	1,5	2,2	3,2	3,9	4,6	192,1	394,7	641,8
9.	0,00015	1,9	2,6	3,4	4,2	5,0	647,2	1514,7	2749
10.	0,00005	2,5	3,2	3,8	4,9	6,0	146,7	3678,0	7003

2. Оптимизация на периодичността на проверки на сложните авиационни системи

Различно е положението с по-сложните устройства, влизащи, например, в състава на бордовите радиоелектронни комплекси (такива, като: навигационни, локационни, свързочни и др.), които като правило са конструктивно оформени автономно. При отказ тези системи не се заменят напълно, а се възстановяват като се заменят само отказалите елементи. Ако в процеса на експлоатация се установи, че средния брой откази (възстановяване) на всяка от изследваните системи за единица време представлява нарастваща функция на времето, то съществува оптимален (по коефициента на готовност) период за изпълнение на мероприятия, които трябва да се осъществяват (по пътя на замяна, регулировки, проверки и т.н.) по такъв начин, че авиационната система напълно да възстанови своите свойства.

Да разгледаме как може да бъде определена оптимална процедура за избор на периоди за пълни възстановявания на системата. Нека да положим ***τ*** да бъде времето между две последователни пълни възстановявания на системата, ***Tп.в.*** – времето за нейното пълно възстановяване, ***M(τ)*** – математическото очакване на сумарното време, което се изразходва за частично възстановяване на системата между две пълни нейни възстановявания. По-нататък ще приемем, че ***Θ*** е времето за едно частично възстановяване на системата.

За намиране на оптималния период от време за възстановяване на системата се въвежда уравнение

(5) $\Theta h(\tau).(\tau + T_{\text{п.в.}}) = \Theta \int_0^{\tau} h(t)\,dt + T_{\text{п.в.}},$

където $h(t) = H'(t)$.

В уравнение (5) $h(t)$ е функция на плътност на възстановяване (честота на отказите), или функция на параметъра на потока откази, която се определя като средния брой откази, предизвикващи частични възстановявания на системата за единица време в периода за нейното пълно възстановяване.

Величината ***Tп.в.*** може да се счита за зададена, а ***Θ*** се определя статистически, като средния брой от всички налични значения на времената за частични възстановявания на системата.

Функцията $h(t)$ се определя от опита на експлоатация. Ако тази функция е монотонно нарастваща [7,8], то съществува единствено решение на уравнение (5).

Нека

$h(t) = p + q.t.$

Тогава от (5) имаме, че

$$\tau^2 + 2\tau T_{\text{п.в.}} + \frac{2}{q}\left(p.T_{\text{п.в.}} - \frac{T_{\text{п.в.}}}{\theta}\right).0,$$

откъдето следва, че

(6) $$\sigma_0 = T_{\text{п.в.}}\left[\sqrt{1 + 2\frac{1-p\theta}{q\theta T_{\text{п.в.}}}} - 1\right].$$

Процедурата за статистическа оценка на функцията за възстановяване ***H(t)*** – среден брой възстановявания на системата, зависи от разглеждания период ***[0,t]***, поради което се явява функция на времето [3,8].

Очевидно е, че

$$H(t) = \int_0^t h(t)\,dt.$$

Функция ***H(t)*** може да бъде определена съгласно закона за големите числа, като средноаритметична от ***n*** на брой функции $\mathrm{H_j(t)}, (\mathrm{j} = 1, 2, \dots, \mathrm{n})$, всяка от които има откази в интервала ***[0,t]*** в ***n*** независими опити.

Съгласно закона за големите числа при $n \to \infty$ функцията

$$\overline{H}_n(t) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} H_j(t)$$

При всяко ***t*** се доближава по вероятност до функцията ***H(t)***.

Отклонението на $\overline{H}_n(t)$ от $H(t)$ може да се извърши по следния начин [7,9]. Ако $H(t)$ е непрекъсната функция, то за всяко ***T*** и ***x > 0*** при $n \to \infty$ ще следва, че

(7) $$P\left\{\max_{0\le 1\le T}\left|\overline{H}_n(t) - H(t)\right| < x\sqrt{\frac{\overline{H}_n(t)}{n}}\right\} \to L(x) = \int_0^x \left[\frac{4}{\sqrt{2\pi}}\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k(2k+1)e^{\frac{(2k+1)^2x^2}{2}}\right]dx.$$

По такъв начин, ако е необходимо при определяне на функция ***H(t)*** в интервала ***[0,T]*** с вероятност ***p*** грешката да не превишава стойност ***α***, то трябва да бъде определено значението на $\boldsymbol{x_p}$ от уравнението $\boldsymbol{L(x_p) = p}$ и след това последователно да се изследва функцията $\overline{H}_n(t)$ (при нарастване на ***n***) до момента, в който бъде изпълнено неравенството

$$x_p^2\frac{\overline{H}_n(t)}{n} \le \alpha^2.$$

Функцията $\overline{H}_n(t)$ при големи стойности на ***n*** се явява практически достатъчна апроксимация за функция ***H(t)***. Но за да бъде получено добро приближение на функция $\overline{H}_n(t)$ към ***H(t)*** е необходим значителен брой изпитания ***n***, тъй като сходимостта в (7) протича твърде бавно.

За намиране на функцията ***h(t)*** е необходимо $\overline{H}_n(t)$ да се апроксимира с крива, която по възможност се описва с прост аналитичен израз.

В таблица 2 са показани резултати от данни, получени с помощта на изчислителна техника [7,9] за грешката при определяне на функция ***H(t)*** в някакъв фиксиран интервал ***[0,T]*** за различни стойности на ***p***, ***α*** и ***n***.

Таблица 2

p	0,8			0,9			0,95			0,99		
α / $\overline{H}_n(t)$	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2	0,05	0,1	0,2
0,1	108	27	7	156	39	10	200	50	12	316	79	20
0,5	544	136	34	790	192	48	1008	252	63	1580	395	99
1,0	1092	273	68	1580	385	96	2020	505	126	3160	790	197
5,0	5500	1365	341	7700	1925	481	10100	2525	631	15800	3950	987
10,0	10920	2730	682	15800	3850	962	20200	5050	1262	31600	7000	1975

Например, ако в интервала ***[0,T]*** функцията $\overline{H}_n(t)$ = 1 при ***n*** = 273, то при определяне на функцията ***H(t)*** с вероятност ***p*** = 0,8 грешката не е по-голяма от 0,1 (***α*** = 0,1).

3. Оптимален срок за експлоатация на системи от РЕО с функционален излишък

Появата на бордови цифрови навигационни комплекси, в които липсват традиционно измервани аналогови изходни параметри, определи необходимостта от нова организация за техническа експлоатация на сложни системи с функционален излишък, на основата на изходна бинарна информация за надеждността на съставящите елементи (работа – отказ) [1,6].

Да разгледаме сложна авиационна техническа система с различни форми на излишък. Такива системи се явяват устойчиви на откази (по отношение на откази на групата елементи). При отказ на някои елементи в тези системи или въобще не се наблюдава понижаване (загуба) на ефективността (при включване на резервите), или се допуска някакво понижаване на тази ефективност.

Да разгледаме авиационна техническа система с функционален излишък, която се състои от ***n*** елемента. Да предположим, че поведението на системата се описва от двоичен вектор

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)],$$

(8) $$x_k(t) = \begin{cases} 0, & \text{ако } k - \text{я елемент е изправен в момент } t, \\ 1, & \text{ако } k - \text{я елемент е отказал в момент } t, \ \ k \le n. \end{cases}$$

Ако във всеки момент от времето ***t*** е известна наработката на ***k***-я елемент (1 ≤ k ≤ n) и я означим като ***Θ_k(t)***, то за общия случай процесът ***X(t)*** може да бъде записан като

(9) $$X(t) = [x_1(t), \theta_1(t), x_2(t), \theta_2(t), \dots, x_n(t), \theta_n(t)].$$

В този случай трябва да се отчита, че разглежданият елемент може да се включва в работа с прекъсвания и тогава наработката му няма да съвпада с календарното време.

Важен момент за анализа в разглежданите авиационни технически системи е определяне на понятието „отказ“. Системата ще се счита за отказала, ако при отказ на елемента системата или напълно ще престане да функционира (нейната ефективност става равна на нула), или функционира така, че ефективността ѝ е по-ниска от зададено функционално ниво.

Да разделим цялото множество състояния на процеса ***X(t)*** на две непресичащи се подмножества

(10) $$X = X_+ \cup X_-, \ X_+ \cap X_- = \emptyset.$$

Тогава, ако $X(t) \in X_+$то системата се счита за изправна, ако $X(t) \in X_-$ то системата се счита за отказала. Моментът на прехода на процеса $X(t)$ от множество X_+ в множество X_- е моментът на отказ на системата.

Да приемем, че процесът $X(t)$ е наблюдаван в моменти $t_k = k.\Delta t$, $k = 0, 1, \dots$, където Δt е стъпката за наблюдение. Наблюдението на процеса се извършва без грешки. Ако се означи $X(t_k) = X_k$, то в моментите t_k (за $k = 0, 1, 2, \dots$) ще наблюдаваме последователност от случайните вектори $X_0, X_1, X_2, \dots, X_k, \dots$, и във всеки момент от време t_k ще имаме информация за цялата траектория на процеса:

$$(X_0, X_1, X_2, \dots, X_k) = \overline{H}_k.$$

Естествено е да се предположи, че в момент t_k $(k = 0, 1, 2, \dots)$ по известната траектория $\overline{\mathrm{X}}_k$ може да се вземе едно от двете решения: да се продължи наблюдението до момент t_{k+1} или да се спре и да се върне функцията в състояние X_0.

Ако в момент t_k $(k = 0, 1, 2, \dots)$ е възникнал отказ на системата, т.е.

$$X_0 \in X_+, \dots, X_{k-1} \in X_+, \dots, X_k \in X_-,$$

то винаги се взема решение да се върне системата в изходно състояние X_0.

Да въведем функцията за специфичните загуби:

(11) $$y_k = \begin{cases} \frac{C_1}{t_k}, & \text{ако към момент } t_k \text{системата не е отказала}, \\ \frac{C_2}{t_k}, & \text{ако към момент } t_k \text{системата е отказала}, \end{cases}$$

където ***C_1*** са средните загуби за възстановяване на системата (за замяна на неизправни елементи) при условие, че системата е изправна в момента на спиране, ***C_2*** са средните загуби за възстановяване на системата в случай, че тя е отказала.

Необходимо е да се опишат процесите и състоянията, които определят спирането на системата. Спиране на системата ще наричаме загубата на функционалност [2,6], която представлява случайна величина ***v***, приемаща стойност 1, 2, 3, …, k и определена в пространството на траекторията на процеса $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k)$. Решението за спиране на процеса в момент t_k трябва да се определя от траекторията $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k)$.

По-прецизно правилото за спиране се определя по следния начин. Да означим с

$$X_k^+ = \underbrace{X_+ * X_+ * \dots * X_+}_{k}$$

декартово произведение на ***k*** еднакви пространства X_+.

Тогава правилото за спиране (случайната величина) ν е моментът на първия резултат на крайната траектория $\bar{X}_k$ извън множеството $A_k \subset X_k^+$. Очевидно е, че

$$P\{\nu < \infty\} = 1.$$

Ако ***v*** е определена, то средните специфични загуби могат да се запишат като:

(12) $$y(\nu) = \sum_{k=1}^{\infty} P\{\nu = k\} y_k,$$

където y_k се определя от (11).

Правилото за спиране (случайната величина) ν е се явява оптимално, ако

(13) $$y(\nu^*) = \min_{\nu} y(\nu).$$

За намиране на правилото ν^* е необходимо да бъде намерено разпределението на величината ν при произволни множества ***A_k***, след това да се намери минимума на величината $y(\nu)$. В общия случай не е възможно да се намери оптимално правило за спиране, поради това минимума на $y(\nu)$ може да се намери като се варира последователно с множествата ***A_k***.

В същото време е в сила спецификата на разглежданите системи [3,7,9] с функционален излишък (монотонни структури), като вероятността за отказ на системата между моментите на съседни наблюдения (t_{k-1}, t_k) нараства с увеличаване на стойността на t_k.

Това обстоятелство за монотонните структури позволява да се намери оптимално правило за спиране, определяно от следното стохастично неравенство:

(14) $$1 - P\{X_k \in X_+ / \bar{X}_{k-1}\} \le \frac{C_1}{A(k-1)},$$

където $A = C_2 - C_1$.

Ако k^* е най-малкото k, за което се изпълнява неравенството (14), то оптималното правило за спиране е $min(t_{k^*}, t_s)$, където t_s е моментът на прехода на $X(t)$ от X_+ в X_- (моментът на отказ на системата).

Заключение

В заключение могат да бъдат направени следните изводи:

При наличие на необходимата обобщена статистическа информация за интензивността на отказите на елементите от авиационното радиоелектронното оборудване, съчетана с евристични оценки и приемливи инженерни допускания, могат да се изработят инженерни приложения за предупредителна замяна на „стареещите“ елементи в сложните технически системи.

Предложеният метод дава научно обоснована възможност за удължаване на ресурса на бордовото РЕО на въздухоплавателните средства, което е особено актуално в този момент.

Подготвена е теоретична основа за решаване на задачата за оптимална експлоатация на група еднородни системи при ограничение на средствата за обслужване.

Предложеният метод може да бъде развит и реализиран и при експлоатацията на авиационни газотурбинни двигатели с модулна конструкция.

Подготвена е теоретична основа за разработване на софтуерни инженерни продукти, подпомагащи работата за техническо обслужване и експлоатация на системите от авиационното радиоелектронното оборудване на въздухоплавателните средства, тъй като дава възможност за замяна при предупреждението за внезапни откази на основните функционални елементи.

Литература:

1. Асенов, Св., Н. Загорски, Сравнителен анализ на продължителността на техническото обслужване и ремонт на въздухоплавателните средства, експлоатирани по планово-предупредителната система и експлоатация по техническо състояние, SCIENTIFIC CONFERENCE on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies БулТранс-2011, September 27-30, 2011 Sozopol, Bulgaria, Proceedings, 26–29 стр.
2. Барзилович, Е. Ю., Ю. В. Лончаков, И. В. Прокопьев. Статистическое оценивание параметров безопасности и надежности транспортных систем по ограниченной исходной информации // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции „Проблемы повышения эффективности функционирования и развития транспорта“, г. Москва. РАН 14 октября 2002 г. М., 2002. С. 3.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей, 10-е издание, стереотипное. „Академия*“.* М. 2005. 573 стр.
4. Загорски, Н., Изследване на възможността за автоматизиране на процеса на анализ на видовете, последствията и критичността на отказите на въздухоплавателните средства, Sixth Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY SES 2010.
5. Загорски, Н., Определяне на нивото на безопасност на полета в усло-вията съхраняване на летателната годност на въздухо-плавателните средства, Eight Scientific Conference with International Participation SPACE, ECOLOGY, SAFETY SES 2012.
6. Загорски, Н., Приближени модели за оптимизация на параметрите за експлоатация и техническо обслужване на авиационните системи с оценка на точността и достоверността на получаваните резултати, Международна научна конференция „Техника, технологии и системи” ТЕХСИС 2009, Технически университет – София, филиал Пловдив, 29-30 май 2009 г., Journal of the Technical University – Sofia, Plovdiv Branch, Bulgaria Vol. 14 (2) 2009, стр. 359–364.
7. Belyaev, Yu. K., T. N. Dugina, N. V. Chistyakova, “Estimation of the reliability of a system with multiple failures on the basis of incomplete data”, Autom. Remote Control, 53:2 (1992), 299–305
8. Brandt, S. Data analysis, Statistical and Computational Methods for Scientist and Engineer, Third Edition. Springer-Verlag. New York. 2003. 687 p.
9. Fisz, M. Probability Theory and Mathematical Statistics. Wiley. New York. 1993. 298 p.