

УДК 629.735

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРАТЕГИЙ КАННИБАЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО ЗАПАСНЫМ ЧАСТЯМ, РЕМОНТУ И РЕСУРСАМ

И.С. ЛЮБОМИРОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Гипичем Г.Н.

В статье рассматриваются результаты анализа системы поддержания лётной годности в условиях дефицита запасных частей, а также некоторые вопросы теории "каннибализма".

Ключевые слова: теория "каннибализма", комплектующие изделия, запасные части, ремонт.

В современных условиях функционирования авиационной транспортной системы (АТС) актуальной остается задача структурирования парка ВС и как составная часть этой задачи - формирование функциональной схемы потребного парка ВС. Решение задачи о выборе конкретного варианта состава и структуры парка ВС осуществляется при условиях, когда ряд исходных данных (количество ВС для конкретного маршрута, количество перевозимых пассажиров) известен приблизительно или вообще неизвестен, т.е. в условиях значительной неопределенности.

Проблема запасных частей состоит в обеспечении требуемого уровня качества устанавливаемых на ВС агрегатов и комплектующих изделий, соблюдении заданных сроков их поставки и надлежащем контроле за их использованием и хранением в процессе эксплуатации и ремонта ВС. При рассмотрении систем ЗЧ и ОФ прежде необходимо пояснить, что понимается под запасной частью и под обменным фондом применительно к АТ.

Запасная часть – это агрегат, узел, деталь (изделие), соответствующее требованиям технической документации, предназначенное для замены в процессе эксплуатации и ремонта установленного на ВС изделия после его отказа или отработки ресурса (срока службы). Запчасти, представляющие собой новые изделия, принято считать изделиями 1-й категории. В теоретическом плане определение потребного количества ЗЧ для изделий, заменяемых по отказам, может быть проведено на основе математического моделирования. При этом модели, описывающие замену изделий в эксплуатации, отличаются от моделей, используемых при ремонте.

При расчете запчастей учитываются также плановые замены изделий, предусмотренные эксплуатационной и ремонтной документацией.

Необходимая исходная информация: планируемое время эксплуатации $T_{пл}$; количество изделий одного типа N ; количество комплектующих одного типа в одном изделии n ; среднее время безотказной работы комплектующего T_0 ; среднее время ремонта комплектующего $t_{рем}$; среднее время транспортировки комплектующего до места ремонта и обратно, включая время оформления документов на отправку $t_{тр}$.

Общее среднее время оборачиваемости складывается из $t_{рем}$ и $t_{тр}$

$$t_o = t_{рем} + t_{тр}. \quad (1)$$

Среднее количество снятий комплектующих определяется исходя из среднего времени безотказной работы

$$d_c = T_{пл} \cdot N / T_0 \quad (2)$$

Ежедневное среднее количество комплектующих, находящихся в процессе транспортировки, ремонта или оформления $d_{\Sigma} = t_0 d_c / 365$. Считая распределение указанных комплектующих пуассоновским с математическим ожиданием μ и дисперсией d_z и используя нормальную аппроксимацию пуассоновского распределения, получим необходимое количество комплектующих запасных частей на складе

$$N_{\text{зап}} = d_{\Sigma} + u\gamma\bar{d}_{\Sigma}, \quad (3)$$

где $u\gamma$ - γ -квантиль стандартного нормального распределения.

Пример 1. Исходные данные: $T_{\text{план}} = 2000$ ч; $N = 5$; $n = 3$; $t_{\text{рем}} = 20$ сут.; $t_{\text{тр}} = 15$ сут.; $t_0 = 1500$ ч; $\gamma = 0,95$.

Результаты расчета: $t_0 = 20 + 15 = 35$ сут.; $d_c = 2000 \cdot 5 \cdot 3 / 1500 = 20$; $d_{\Sigma} = 35 \cdot 20 / 365 = 2$; $N_{\text{зап}} = 2 + 1,65\sqrt{2} = 4,31$. Принимаем $N_{\text{зап}} = 5$.

Проведем анализ основных факторов, влияющих на количество запасных частей. Факторы $T_{\text{пл}}$, N , γ находятся в компетенции эксплуатирующей организации. Время ремонта "замораживает" вложенные средства и наносит экономический ущерб эксплуатирующей организации. Выбор ремонтной организации и связанного с ним времени транспортировки обычно производится эксплуатирующей организацией.

Среднее время безотказной работы играет главную роль в экономике эксплуатации при большом парке изделий и длительном планируемом времени эксплуатации. Увеличение этого времени должно стать основным направлением деятельности как организаций разработчика и изготовителя, так и эксплуатирующей организации.

В процессе эксплуатации некоторых видов техники ощущается хронический дефицит запасных частей. В этих условиях для ремонта техники используют детали (элементы, блоки и т.д.) комплексов, простаивающих по причине отказа какой-либо одной детали.

Это тем более верно для старой техники. Для этой техники интенсивность отказов возрастает, запасные элементы становятся все более дефицитными (промышленность прекращает их выпуск), техника используется из-за простоев все меньше и меньше.

В этих условиях естественен переход к "каннибализму": выбираются одна или несколько единиц оборудования для того, чтобы обеспечить снабжение запасными элементами оставшихся единиц оборудования.

В ряде случаев для поддержания приемлемой эффективности работы техники используют детали работающей техники, помещая их на места отказавших деталей, которые выполняют в комплексе более важные функции. В этом случае, естественно, детали должны быть однотипными. За рубежом научное направление, связанное с поддержанием надежности техники за счет собственных ресурсов (при ограничении или отсутствии запасных элементов), называют теорией "каннибализма". В этой области имеется довольно большое число публикаций. Покажем основные "идеи" этой теории (рис. 1.)

Пусть имеем два различных типа оборудования (в частном случае два одинаковых типа) одного и того же назначения. Каждая единица оборудования состоит из многих элементов. Некоторые из этих элементов имеют также два типа оборудования (подэлементов), а остальные - единственный тип подэлементов. В принципе можно рассмотреть и более чем два типа оборудования, но мы для простоты рассмотрим случай двух типов оборудования. В каждый тип оборудования может входить различное число единиц однотипных элементов. Считаем, что отказавшие элементы не ремонтируются, замена осуществляется мгновенно, каннибализация совершенна (всегда можно на место более важного элемента поставить любой однотипный элемент оборудования).

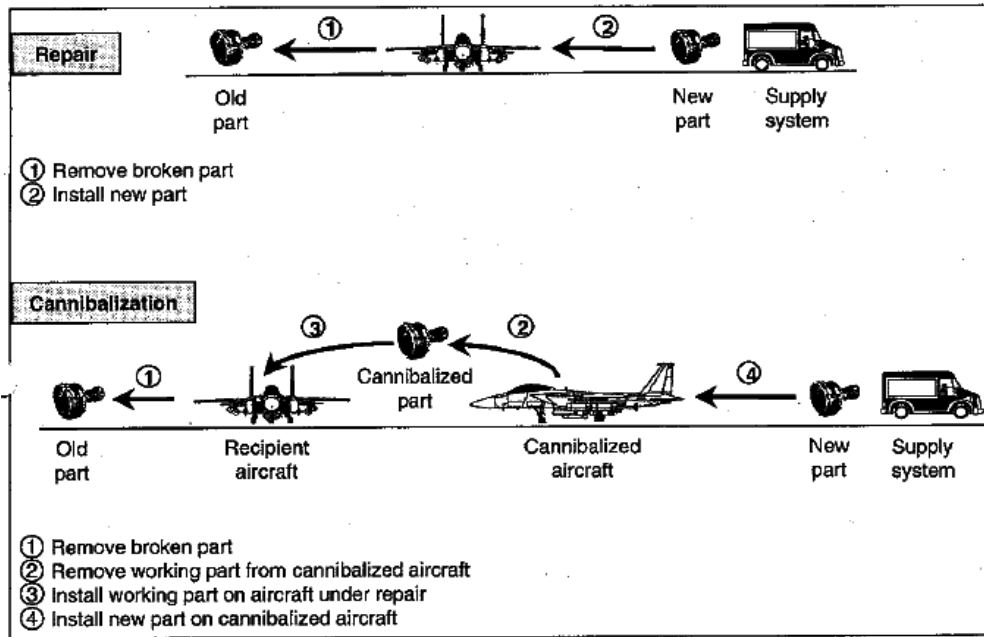


Рис. 1. Каннибализация как стратегия поддержания лётной годности

("hearing before the subcommittee on national security, veterans affairs and international relations of the committee on government reform house of representatives one hundred seventh congress first session" may 22, 2001 serial no. 107-70)

Снятие любого элемента приводит к тому, что часть оборудования выключается из оперативной работы. Отказы элементов происходят по пуассоновскому закону внутри дискретного (заданного) временного интервала, при этом интенсивность отказов может быть функцией временного интервала. Полагаем, что общее планируемое время оперативной работы оборудования фиксировано для каждого дискретного интервала времени и вырабатывается независимо от числа единиц оборудования, имеющегося в наличии. Например, если планируется 200 ч работы оборудования и имеется 10 единиц оборудования, то каждая единица будет выполнять свои функции 20 ч, а если имеется 5 единиц оборудования, то каждая единица будет работать 40 ч. Введем следующие обозначения:

C - число различных типов элементов оборудования;

N - число имеющихся вначале в наличии единиц оборудования;

N_j - число единиц оборудования типа j ($j = 1, 2, N_1 < N_2$, по предположению, $N = N_1 + N_2$);

S_i - начальное число запасных элементов типа i ($i = 1, \dots, C$);

Q_{ij} - количество элементов типа i в оборудовании типа j ($i = 1, \dots, C; j = 1, 2$);

$T(t)$ - общее планируемое время работы оборудования в течение дискретного интервала времени t ;

$\lambda_i(t)$ - функция интенсивности отказов элемента типа i , $i = 1, \dots, C$ (число отказов за час оперативной работы);

$D_i(t)$ - число отказов элемента типа i в течение дискретного интервала t , $i = 1, \dots, C$;

$$0 \leq D_i(t) \leq S_i + \sum_{j=1}^2 N_j Q_{ij}; \quad (4)$$

$X_i(t)$ - общее число отказов элементов типа i для всех дискретных интервалов времени от 1 до t , $i = 1, \dots, C$

$$0 \leq X_i(t) \leq S_i + \sum_{j=1}^2 N_j Q_{ij}; \quad (5)$$

$NC_j(t)$ - число единиц оборудования типа j , каннибализированных к концу дискретного периода времени t , $j = 1, 2$

$$0 \leq NC_j(t) \leq N_j; \quad (6)$$

$NA(t)$ - число единиц оборудования, имеющегося в наличии для использования в конце дискретного периода времени t ,

$$0 \leq NA(t) \leq N. \quad (7)$$

Задача заключается в том, чтобы определить вероятностное распределение, математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины $NA(t)$ с учетом использования ограниченного числа запасных элементов и каннибализации. Так как часы оперативной работы распределяются между двумя типами оборудования (используем отношение N_j/N), то для математического ожидания случайной величины $D_i(t)$ имеем

$$M[D_i(t)] = \sum_{j=1}^2 \left(\frac{N_j}{N}\right) Q_{ij} \lambda_i(t) T_i(t). \quad (8)$$

Так как $D_i(t)$ имеет пуассоновское распределение, то $X_i(t)$ также распределена по закону Пуассона, ибо она есть сумма пуассоновских распределенных случайных величин, поэтому

$$M[X_i(t)] = \sum_{p=1}^t D_j(p). \quad (9)$$

Вероятностное распределение $NA(t)$ зависит от числа каннибализируемых единиц $NC_1(t)$ и $NC_2(t)$. В частности, для некоторого заданного K ($0 \leq K \leq N$)

$$P\{NC_1(t) + NC_2(t) \geq K\} = P\{NC_1(t) + NC_2(t) \leq K\}. \quad (10)$$

Чтобы вычислить значение

$$P\{NC_1(t) + NC_2(t) \leq K\}, \quad (11)$$

нужно перебрать все возможные события, приводящие к событию, заключенному в фигурные скобки. Эта идея использована для вычисления функции «оставшихся в живых» элементов $NA(t)$ в приводимых ниже выражениях.

Если $K \leq N_1$, то

$$P\{NA(t) \geq N - K\} = P\{NC_1(t) \leq K \cap NC_2(t) \cup (NC_1(t) \leq K - 1 \cap NC_2(t) \leq 1) \cup \dots \cup (NC_1(t) \leq 0 \cap NC_2(t) \leq K)\}. \quad (12)$$

Если $N_1 < K \leq N_2$, то

$$P\{NA(t) \geq N - K\} = P\{NC_1(t) \leq K \cap NC_2(t) \leq K - N_1 \cup (NC_1(t) \leq N_1 - 1 \cap NC_2(t) \leq K - N_1 + 1) \cup \dots \cup (NC_1(t) \leq 0 \cap NC_2(t) \leq K)\}. \quad (13)$$

Если $N \leq K \leq N_1$, то

$$P\{NA(t) \geq N - K\} = P\{NC_1(t) \leq N_1 \cap NC_2(t) \leq 0 \cup (K - N_1) \cup (NC_1(t) \leq N_1 - 1 \cap NC_2(t) \leq K - N_1 + 1) \cup \dots \cup (NC_1(t) \leq K - N_2 \cap NC_2(t) \leq N_2)\}. \quad (14)$$

Установим связь между событиями, содержащими случайные величины $NC_1(t)$ и $X(t)$. Запишем для любых величин Z_1 и Z_2 ($0 \leq Z_j, j = 1, 2$)

$$\begin{aligned} NC_1(t) \leq Z_1 \cap NC_2(t) \leq Z_2 &= ((X_1(t) \leq S_1 + Z_1 * Q_{11} + Z_2 * \\ Q_{12}) \cap (X_2(t) \leq S_2 + Z_1 * Q_{21} + Z_2 * Q_{22}) \cap \dots \cap (X_C(t) \leq \\ \leq S_C + Z_1 * Q_{c1} + Z_2 * Q_{cr} \end{aligned} \quad (15)$$

С учетом (15) формулы (12)...(14) определяют соответственно искомое вероятностное распределение, математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины $NA(t)$:

$$P\{NA(t) = N - K\} = P\{NA(t) \leq N - K\} - P\{NA(t) \geq N - K + 1\}; \quad (16)$$

$$M[NA(t)] = \sum_{K=0}^N (N - K) P\{NA(t) = N - K\}; \quad (17)$$

$$\sigma[NA(t) = \text{SQRT}(\sum_{K=0}^N (N - K)^2 P\{NA(t) = N - K\} - M^2[NA(t)]). \tag{18}$$

Обобщение изложенной модели на три и более различных типа оборудования приводит к усложнениям непринципиального характера. Например, для трех типов оборудования формула (12) примет вид

$$P\{NA(t) \geq N - K\} = P\{NC_1(t) \leq K \cap NC_2(t) \leq 0 \cap NC_3(t) \leq 0\} \cup \\ (NC_1(t) \leq K - 1 \cap NC_2(t) \leq 1 \cap NC_3(t) \leq 0) \cup (NC_1(t) \leq K - 1 \cap NC_2(t) \leq \\ 0 \cap NC_3(t) \leq 1 \cup \dots \cup (NC_1(t) \leq 0 \cap NC_2(t) \leq 0 \cap NC_3(t) \leq K) \} \tag{19}$$

Рассмотрим пример, иллюстрирующий описанную выше вычислительную процедуру.

Пусть имеем: $N = 6$ единицам оборудования, $N_1 = 2$ единицам оборудования первого типа и $N_2 = 4$ единицам оборудования второго типа. Имеется $C = 8$ установленным в оборудовании типам элементов.

Для каждого типа элементов известны: функция интенсивности отказов (в каждом временном интервале), первоначальное число запасных элементов и число элементов в каждом типе оборудования. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип элемента i	Интенсивность отказов (в ч) $\lambda i(t) \cdot 10^{-4}$	Начальное число запасных элементов типа i	Количество элементов в каждом типе оборудования	
			Qi1	Qi2
1	8,1	1	1	1
2	3,0	2	3	3
3	6,5	1	1	3
4	8,1	0	1	0
5	10,1	1	2	0
6	5,0	1	0	1
7	7,9	1	0	1
8	2,5	1	0	3

Общее планируемое время оперативной работы оборудования $T(t)=100$ ч.

Ниже проиллюстрированы общие вычислительные процедуры для данного примера (результаты применения выражений (8)...(18) после $t = 12$ интервалам работы оборудования; в рамках этих 12 интервалов работы оборудование функционировало 1200 ч:

$$M[D_3(12)] = (2/6) \cdot (1) \cdot (0.00065) \cdot (100) + (4/6) \cdot (3) \cdot (0.00065) \cdot (100) = 0.15167$$

$$M[D_i(12)], i = 1, \dots, 8:$$

$$0,81; 0,90; 0,1516; 0,027; 0,0673; 0,033; 0,0526; 0,050.$$

$$M[X_3(12)] = 12 \cdot (0,15167) = 1,82$$

$$M[X_i(12)], i = 1, \dots, 8;$$

$$0,972; 1,080; 1,820; 0,324; 0,808; 0,400; 0,632; 0,600.$$

$$P\{NA(12) \geq 6 - 1\} P\{(NC_1(12) \leq 1 \cap NC_2(12) \leq 0 \cup (NC_1(12) \leq 0 \cap NC_2(12) \leq 1)\}.$$

$$P\{NA(12) \geq 6 - 1\} = P\{(X_1(12) \leq 2 \cap X_2(12) \leq 5 \cap (X_3(12) \leq 2 \cap$$

$$X_4(12) \leq 1 \cap X_5(12) \leq 3 \cap X_6(12) \leq 2 \cap X_7(12) \leq 2 \cap X_8(12) \leq 4) \} =$$

$$(0.9248) \cdot (0.9991) \cdot (0.7253) \cdot (0.9676) \cdot (0.9906) \cdot (0,9384) \cdot (0.8059) \cdot (0.9921) \cdot (0.9736) \cdot (0.9996) \cdot (0.9248) \cdot (0.9991) \cdot (0.7253) \cdot (0.7232) \cdot$$

$$(0.8059) \cdot (0.9384) \cdot (0,8674) \cdot (0.8781) = 0.6755.$$

$$P\{NA(12) \geq 6 - K\},$$

$$K = 0, \dots, 6: 0.1284; 0.6755; 0.9450; 0.9927; 0.9990; 0.9999; 1.000.$$

$$M[NA(12)] = 4,744; \sigma[NZ(12)] = 0,77.$$

На рис. 2 проиллюстрировано изменение величин $M[NA(t)]$ и $P\{NA(t) \geq 3\}$ по 48 временным интервалам.

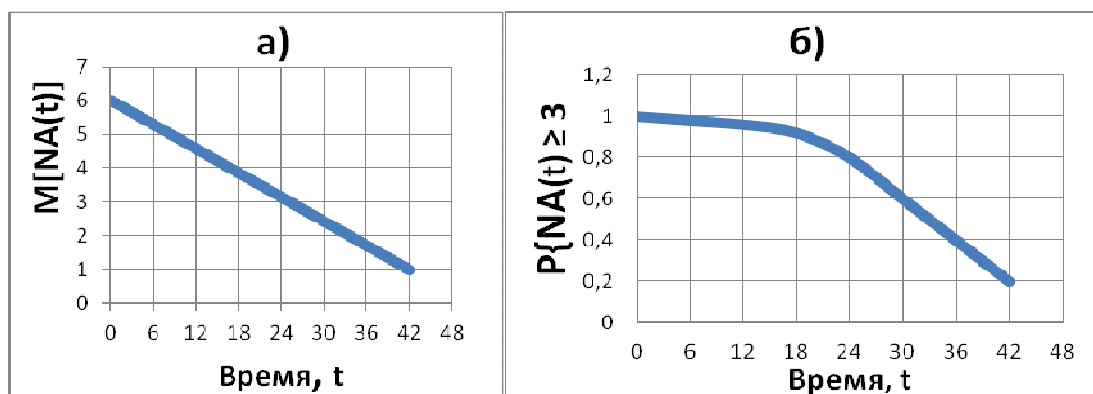


Рис. 2. Изменение величины $M[NA(t)]$ (а) $P\{NA(t) \geq 3\}$ (б)

ЛИТЕРАТУРА

1. Гипич Г.Н. Концепция и модели прогнозирования и снижения рисков при обеспечении летной годности воздушных судов гражданской авиации: монография / под ред. Е.Ю. Барзиловича. - М.: Теис, 2005.
2. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Круглов В.И. и др. Безопасность и надёжность технических систем. - М.: Университетская книга, Логос, 2008.
3. Burkett D.L. Units of equipment available using cannibalization for repair-part support // JEEE Trans. Reliab.1985.

EFFECTIVENESS OF STRATEGIES CANNIBALIZATION SYSTEM MAINTENANCE WITH RESTRICTIONS ON SPARE PARTS AND REPAIR RESOURCES

Lyubomirov I.S.

The article reviews the results of the analysis system for maintaining the airworthiness of the shortage of spare parts. The theory of "cannibalism".

Key words: theory of Cannibalizm, completing products, spare parts, repair.

Сведения об авторе

Любомиров Иван Сергеевич, 1985 г.р., окончил СПбГУ ГА (2009), аспирант СПбГУ ГА, ведущий инженер-инспектор Отдела расследований и контроля поддержания летной годности ОАО "Авиакомпания "Россия", автор 4 научных работ, область научных интересов – поддержание летной годности, безопасность полётов.