

1. Есин В.И., Короткий В.А., Кузнецова В.Ф. Стабилизация параметров автономного источника питания //Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1985. С. 35-43.

2. Залманзон Л.А. Замечание о влиянии жидкости в каналах на величину приведенной массы подвижных частей гидравлического регулятора //Автоматика и телемеханика. 1956. № 3. С. 274-275.

УДК 621.3.019.3

А.М.Мальшев

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ  
МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
С РЕЗЕРВИРОВАННЫМ АВИАЦИОННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Излагается алгоритм формализованного построения граф-моделей взаимодействия при периодическом диагностировании идеальных средств диагностирования (*СрД*) с резервированным авиационным оборудованием, которое представляет собой совокупность  $n$  однотипных структурных единиц (*СЕ*) и требует для своего нормального функционирования  $m$  работоспособных *СЕ*,  $m \leq n$ . В процессе взаимодействия с оборудованием *СрД* решают задачи определения (контроля) работоспособности и поиска дефектов. Восстановление отказавших *СЕ* - полностью ограниченное. Алгоритм основан на переборе элементов векторов-строк, вводимых для каждого  $k$  -го числа отказавших *СЕ*, с последующей корректировкой, определяемой стратегией восстановления отказавших *СЕ*.

На эффективность авиационного оборудования (АО) в большой степени влияет его надежность. Для того, чтобы можно было оценить надежность АО в период использования, необходимо знать его

---

Динамические процессы в установках ЛА. Куйбышев, 1990

---

состояние. С этой целью АО и обслуживающие его средства диагностирования (*СрД*) объединяются в одну систему, называемую системой диагностирования (СД). При этом АО представляет собой объект диагностирования (ОД). Поскольку целевым назначением СД является повышение эффективности ОД, то качество СД целесообразно оценить по показателю, характеризующему эффективность ОД. Если в качестве такого критерия применить вероятность нормального функционирования ОД, определяемую как вероятность того, что ОД в произвольный момент времени окажется в работоспособном состоянии, то величина этой вероятности будет определять эффективность ОД с позиции готовности к использованию и обеспечивать комплексную оценку надежности ОД. Вероятность нормального функционирования ОД аналитически может быть определена в результате решения системы уравнений, которая составляется по модели взаимодействия ОД и *СрД* в СД, т.е. по графу переходов СД из состояния в состояние.

Ниже излагается алгоритм формализованного построения моделей взаимодействия восстанавливаемых резервированных ОД с обслуживающими их *СрД*. Известны модели взаимодействия *СрД* с резервированными непрерывно диагностируемыми ОД. Новизна предлагаемого алгоритма определяется тем, что он позволяет формализованно строить модели взаимодействия *СрД* с резервированными периодически диагностируемыми ОД.

Взаимодействие *СрД* с резервированными ОД при периодическом диагностировании. Резервированный ОД представляет собой совокупность  $n$  однотипных структурных единиц (СЕ). Для нормального функционирования ОД необходимо, чтобы работоспособными (неотказавшими) были не менее  $m$  СЕ из  $n$  СЕ, находящиеся в резерве, не функционируют (выключены). *СрД* состоит из совокупности средств определения работоспособности и поиска дефектов. С помощью средств определения работоспособности можно одновременно (параллельно во времени) оценивать работоспособность всех СЕ ОД. С помощью средств поиска дефектов отказавшие СЕ можно восстанавливать только последовательно во времени — по одной (полностью ограниченное восстановление). Работоспособность ОД оценивается периодически в случайные моменты времени в специальном режиме, в котором ОД не используется по целевому назначению. Если в результате диагностирования (определения работоспособности) ОД

установлено, что число неработоспособных (отказавших) СЕ таково, что необходимые для нормального функционирования ОД  $m$  СЕ работоспособны, т.е. работоспособен и сам ОД, то такой ОД после диагностирования в специальном режиме переводится вновь в рабочий режим, а СЕ, о которых стало известно, что они неработоспособны, начинают по одной последовательно восстанавливаться, пока не останется ни одной неработоспособной СЕ. Если в результате диагностирования ОД стало известно, что число работоспособных СЕ меньше необходимого для нормального функционирования ОД числа  $m$  СЕ, неработоспособные СЕ начинают по одной последовательно восстанавливаться, а ОД в это время пребывает в специальном режиме, т.е. не функционирует. Сразу после того, как в результате восстановления число работоспособных СЕ достигнет  $m$ , ОД переводится в рабочий режим, а оставшиеся неработоспособные СЕ продолжают по одной последовательно восстанавливаться, пока не будут восстановлены все СЕ, о которых было известно, что они неработоспособны.

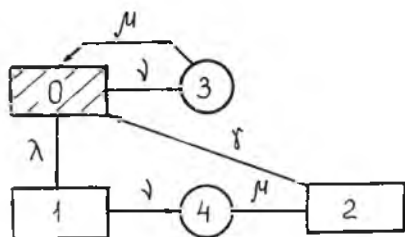
**О г р а н и ч е н и я.** Модель взаимодействия *СрД* с резервированными ОД в общем случае может быть чрезвычайно громоздкой, поэтому с целью разумного упрощения моделей все дальнейшие рассуждения будем вести, считая, что имеют место следующие ограничения:

все величины, описывающие процесс взаимодействия структурных единиц и ОД со средствами диагностирования, случайные, а события, которые эти величины характеризуют, образуют простейшие потоки;

СЕ, пребывающие в резерве (выключенные) и находящиеся в специальном режиме, не отказывают (абсолютно безотказны);

*СрД* и исполнители, участвующие в процессе диагностирования, идеальны, причем последние из рассмотрения исключены.

Модель взаимодействия *СрД* с нерезервированным ОД при периодическом диагностировании. Для облегчения понимания алгоритма построения граф-модели взаимодействия при периодическом диагностировании *СрД* с резервированным ОД сначала рассмотрим граф-модель взаимодействия *СрД* при периодическом диагностировании с нерезервированным ОД. Нерезервированный ОД можно рассматривать как ОД, состоящий из одной СЕ, т.е. ОД, у которого  $n = m = 1$ . Граф-модель взаимодействия *СрД* с нерезервированным периодически диагностируемым ОД приведена на рис. 1



Г и с. 1. Граф взаимодействия идеальных *срд* с нерезервированным ОД при периодическом диагностировании

Г и с. 1. Граф взаимодействия идеальных *срд* с нерезервированным ОД при периодическом диагностировании ОД (СД);  $\lambda$  - интенсивность определения (проверки, контроля) работоспособности ОД (СД),  $\lambda = T_K^{-1}$ , где  $T_K$  - средняя длительность определения (проверки, контроля) работоспособности ОД (СД).

Вершины графа (рис. 1) соответствуют следующим несовместным состояниям системы диагностирования: 0 - ОД нормально функционирует, работоспособные *срд* выключены; 1 - ОД функционирует ненормально, работоспособные *срд* выключены; 2 - неработоспособный ОД восстанавливается в специальном режиме, работоспособные *срд* находятся в рабочем режиме; 3 - в специальном режиме проверяется работоспособность работоспособного ОД, работоспособные *срд* находятся в рабочем режиме; 4 - в специальном режиме проверяется работоспособность неработоспособного ОД, работоспособные *срд* находятся в рабочем режиме.

Вершины, соответствующие состояниям СД, в которых ОД работоспособен, в дальнейшем будем заштриховывать. При графическом представлении моделей взаимодействия *срд* с периодически диагностируемыми ОД состояния, соответствующие проверке работоспособности ОД, будем обозначать символом  $\bigcirc$  и нумеровать эти состояния в последнюю очередь, т.е. после того, когда пронумерованы все состояния, обозначаемые символом  $\square$ .

Граф, приведенный на рис. 1, можно упростить, объединив вершины 1 и 4. Объединение вершин 1 и 4, как будет видно из дальнейшего, помогает значительно упростить модели взаимодействия со средствами диагностирования периодически диагностируемых ОД. Вер-

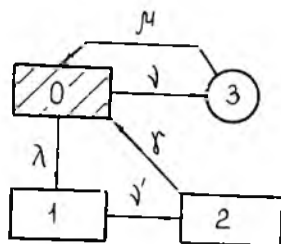
На рис. 1 приняты обозначения:  $\lambda$  - интенсивность отказов ОД (СД),  $\lambda = T_0^{-1}$ , где  $T_0$  - средняя наработка ОД (СД) до отказа;  $\gamma$  - интенсивность восстановления ОД (СД),  $\gamma = T_B^{-1}$ , где  $T_B$  - средняя длительность восстановления ОД (СД);  $\nu$  - интенсивность (периодичность) диагностирования ОД (СД),  $\nu = T_g^{-1}$ , где  $T_g$  - средний период диагности-

шине, включающей в себя вершины 1 и 4, оставляем символ  $\square$  и номер 1. После такой операции граф, приведенный на рис. 1, будет иметь вид, показанный на рис. 2. Вследствие объединения вершин 1 и 4 графа, изображенного на рис. 1, ОД должна в вершинах 1 и 4 (рис. 1) находиться столько же времени, сколько она будет находиться в вершине 1 графа, приведенного на рис. 2. Это означает, что оператор  $\nu'$  перехода 1  $\rightarrow$  2 графа, представленного на рис. 2, должен определяться из равенства  $\frac{1}{\nu} + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\nu'}$ , решив которое, находим

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{\nu}{\mu}}. \quad (1)$$

Построение модели взаимодействия Срд с резервированным ОД при периодическом диагностировании и. Алгоритм построения граф-модели рассмотрим на примере ОД, у которого  $n = 5$ , а  $m = 3$ . Отдельные функционирующие СЕ резервированного ОД во время восстановления других СЕ ОД могут отказывать. Поскольку отказавшие СЕ могут восстанавливаться только по одной, может образовываться очередь из СЕ, ожидающих восстановления, о которых известно, что они отказали. Назовем такую очередь активной. При периодическом диагностировании СЕ резервированного ОД, которые отказали до проведения очередного диагностирования (определения работоспособности) ОД, с момента своего отказа находятся в состоянии скрытого простоя. Если за период диагностирования у резервированного ОД отказало несколько СЕ, то можно считать, что такие отказавшие СЕ образуют очередь на восстановление. В отличие от активной очереди, в которой пребывают СЕ, о которых известно, что они отказали, очередь из СЕ, о которых неизвестно, что они отказали, назовем пассивной.

Обозначим через  $K$   $K$  -е число отказов СЕ рассматриваемого ОД и определим границы  $K_{\min}$  и  $K_{\max}$  изменения величины  $K$ .



Р и с. 2. Укрупненный граф взаимодействия идеальных Срд с резервированным ОД при периодическом диагностировании

Первоначально - в момент времени  $t = 0$  ( $t$  - текущее время) - нет ни одной отказавшей СЕ (все СЕ работоспособны), т.е.  $K_{мин} = 0$ . Поскольку диагностирование ОД производится в дискретные моменты времени, то на интервале времени между окончанием предыдущего и началом последующего специальных режимов могут отказаться все  $n$  СЕ рассматриваемого ОД, т.е.  $K_{макс} = n = 5$ . Таким образом,  $0 \leq K \leq n = 5$ .

Для каждого  $K$ -го ( $K = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) числа отказов СЕ ОД введем векторы-строки  $\bar{V}_q = (V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)})$ , состоящие из трех элементов. Элементом  $V_q^{(3)}$  будет число непосредственно восстанавливаемых СЕ. В нашем случае, поскольку на восстановлении может находиться не более одной СЕ (полностью ограниченное восстановление),  $V_q^{(3)}$  будет изменяться от 0 до 1, т.е.  $V_q^{(3)}$  может быть либо нулем, либо единицей. Элементом  $V_q^{(2)}$  вектора  $\bar{V}_q$  будет число отказавших СЕ ОД, пребывающих после определения работоспособности в активной очереди в ожидании восстановления,  $V_q^{(2)}$  может изменяться от 0 до  $n-1=4$ ,  $V_q^{(2)} = 0, n-1$ . Элементом  $V_q^{(1)}$  будет число отказавших СЕ ОД, о которых неизвестно, что они отказали, пребывающих в пассивной очереди в ожидании перевода в активную очередь, т.е. в конечном счете, восстановления,  $V_q^{(1)} = 0, n$ .

Алгебраическая сумма элементов  $V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)}$  каждого вектора  $\bar{V}_q$  всегда равна числу  $K$  возможных отказов СЕ рассматриваемого ОД:  $V_q^{(1)} + V_q^{(2)} + V_q^{(3)} = K$ . Это означает, что вектор  $\bar{V}_q$  полностью описывает  $q$ -е состояние системы "ОД - СрД", т.е. ОД в целом, при числе отказов СЕ ОД равно  $K$ , причем такие  $q$ -е состояния названной системы являются несовместными.

Затем следует записать таблицу несовместных состояний ОД, в которых ОД работоспособен. Таблица состоит из двух частей. В первой (левой) части записываются числа отказов СЕ ОД, не нарушающих нормального функционирования ОД. Во второй (правой) части записываются соответствующие векторы (состояния)  $\bar{V}_q = (V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)})$ . Поскольку резервированный ОД будет нормально функционировать при  $n=m$  отказавших СЕ, то максимальное число  $K_{нф}$  отказов СЕ, не нарушающих нормального функционирования ОД, равно  $K_{нф} = n - m$ . В нашем случае  $n = 5$ ,  $m = 3$ , поэтому  $K_{нф} = 2$ . Это означает, что при  $K = 0, 1, 2$  отказавших СЕ ОД функционирует нормально (работоспособен). Причем при  $K = 0$  ОД может находиться

в одном состоянии (0, 0, 0), при  $K = 1$  - в двух состояниях: (1, 0, 0), (0, 0, 1), при  $K = 2$  - в трех состояниях: (2, 0, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1). Таким образом, в имеем место случае ( $n = 3$ ,  $m = 3$ ) число состояний СД, в которых ОД работоспособен, равно шести.

Теперь составим таблицу несовместных состояний СД (табл. 1), в которых ОД неработоспособен. Она также состоит из двух частей. В первой (левой) части записываются числа отказов СЕ ОД, нарушающих нормальное функционирование ОД -  $K = n - m + 1, n$ . Во второй (правой) части записываются соответствующие векторы (состояния)  $\bar{V}_q$ .

Т а б л и ц а 1

$K$	$\bar{V}_q = (V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)})$
0	(0, 0, 0)
1	(1, 0, 0), (0, 0, 1)
2	(2, 0, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1)

Таблица состояний СД, в которых ОД неработоспособен (табл. 2), определяется стратегией восстановления отказавших СЕ ОД. При имеющейся стратегии восстановления отказавших СЕ не все несовместные состояния СД могут быть записаны в результате перебора элементов  $V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)}$  векторов  $\bar{V}_q$  при  $K = 3, 4, 5$ . Поясним сказанное. Для этого сначала запишем таблицу несовместных состояний СД, в которых ОД неработоспособен, которые могут быть получены перебором элементов  $V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)}$  при  $K = 3, 4, 5$ .

Т а б л и ц а 2

$K$	$\bar{V}_q = (V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)})$
3	(3, 0, 0), (2, 0, 1), (1, 1, 1), (0, 2, 1)
4	(4, 0, 0), (3, 0, 1), (2, 1, 1), <del>(1, 2, 1)</del> , (0, 3, 1)
5	(5, 0, 0), (4, 0, 1), (3, 1, 1), <del>(2, 2, 1), (1, 3, 1)</del> , (0, 4, 1)

Рассмотрим табл. 2. Все состояния в табл. 2, соответствующие  $K = 3$ , будут иметь место. Однако, если состояния (3, 0, 0), (2, 0, 1), (1, 1, 1) соответствуют пребыванию ОД при трех отказавших

СЕ в рабочем режиме, то состояние (0, 2, 1) соответствует нахождению СД после определения работоспособности в специальном режиме. Поскольку СЕ ОД во время пребывания в специальном режиме не отказывают, то из состояния (0, 2, 1) СД может перейти только в состояние (0, 1, 1), в котором ОД работоспособен. Это означает, что не могут иметь места состояния (1, 2, 1) и (2, 2, 1). Рассуждая аналогичным образом, можно прийти к выводу, что не может иметь место состояние (1, 3, 1). Вследствие изложенного состояния (1, 2, 1), (2, 2, 1), (1, 3, 1) вычеркиваем из табл. 2. Операцию вычеркивания обозначим символом  $\times$ .

Соединив табл. 1 и 2, можем записать таблицу несовместных состояний СД рассматриваемого резервированного ОД (табл. 3).

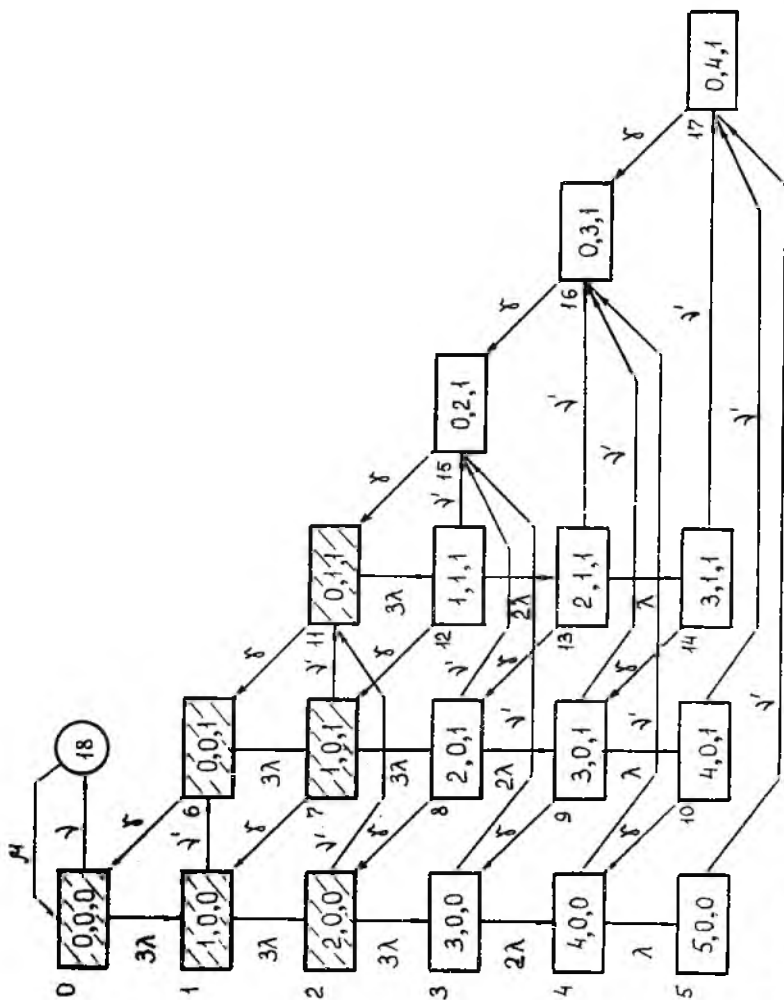
Т а б л и ц а 3

$K$	$\bar{V}_q = (V_q^{(1)}, V_q^{(2)}, V_q^{(3)})$
0	(0, 0, 0)
1	(1, 0, 0), (0, 0, 1)
2	(2, 0, 0), (1, 0, 1), (0, 1, 1)
3	(3, 0, 0), (2, 0, 1), (1, 1, 1), (0, 2, 1)
4	(4, 0, 0), (3, 0, 1), (2, 1, 1), (0, 3, 1)
5	(5, 0, 0), (4, 0, 1), (3, 1, 1), (0, 4, 1)

В табл. 3 несовместные состояния СД, в которых ОД работоспособен, пунктирной линией отделены от состояний СД, в которых ОД неработоспособен.

От табл. 3 перейдем к графу. Вершины графа будем обозначать символом  $\square$  и записывать в них соответствующий вектор-строку  $\bar{V}_q$ . Табл. 3 должна быть принята за основу графа. Располагаем вершины  $\square$  так, как расположены векторы  $\bar{V}_q$  в табл. 3 - рис. 3. Вершины графа (рис. 3) соединяем ветвями (стрелками). Символ  $\downarrow$  означает отказ СЕ, символ  $\rightarrow$  ( $\curvearrowright$ ) - функционирование ОД, символ  $\nwarrow$  - восстановление одной СЕ ОД. Ветви, соответствующие функционированию ОД и восстановлению СЕ, имеют операторы соответственно  $\gamma' (I)$  и  $\gamma' : \gamma' = \frac{\gamma'}{(\gamma')^n}$ . Ветви, соответствующие отказам СЕ, имеют операторы  $\lambda^{(k)} = \rho_k \lambda$ , где  $\rho_k$  - число функционирующих работоспособных СЕ. В рассматриваемом случае  $\rho_k = m$  при  $0 \leq k \leq n-m$  и  $\rho_k = n-k$  при  $n-m+1 \leq k \leq n$ .





Р и с. 3. Граф взаимодействия идеальных СрД с резервированным ОД при периодическом диагностировании

Это означает, что

$$a^{(k)} = \begin{cases} ma, & 0 \leq k \leq n-m, \\ (n-k)a, & n-m+1 \leq k \leq n. \end{cases}$$

Вершина  $\boxed{0, 0, 0}$  при периодическом диагностировании предполагает добавление к множеству имеющихся место вершин графа (см. рис. 3) одной дополнительной вершины  $\bigcirc$ , которая соответствует диагностированию (определению работоспособности) работоспособного ОД. Вершина  $\boxed{0, 0, 0}$  и вершина  $\bigcirc$  связаны между собой так, как показано на рис. 1 и 2.

Затем следует пронумеровать вершины графа. Нумерацию вершин графа следует проводить по "вертикалям" (столбцам), всегда присваивая вершине  $\bigcirc$  последний номер. Таким образом, число вершин графа (рис. 3) равно девятнадцати. Вершины, соответствующие состояниям СД, в которых ОД работоспособен, заштрихованы.

Изложенный алгоритм реализован в виде программы, которая работает на ЭВМ СМ4, СМ1420, СМ1600 и других с подобной архитектурой, использующих операционную систему ОС РВ любой вертикали.