

Цена 11 коп.

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

---

**Б. Н. ОКОЕЛОВ**

**ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ**

Учебное пособие по курсу  
«Основы теории надежности»

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени  
высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

---

Б.Н.ОКОЁМОВ

Утверждено редсоветом МВТУ  
как учебное пособие

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

Учебное пособие по курсу  
"Основы теории надежности"

Под редакцией И.А.Михалева

---

Москва

1985

Данное учебное пособие издаётся в соответствии с учебным планом. Рассмотрено и одобрено кафедрой П-4 18.05.84 г., методической комиссией факультета П 23.05.84 г. и учебно-методическим управлением 19.06.84 г.

Рецензент к.т.н. доц. ВЗМИ Черемисинова С.Н.

© Московское высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

Барит Николаевич Окоемов

Редактор Ю.Н.Хлебинский

Корректор Л.И.Малютина

Заказ 490. Объем 3,25 п.л. (3 уч.-изд.л.) Тираж 300 экз.  
Д-93550 от 18.01.85 г. Цена II коп. План 1984 г., № 19 доп.

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование гироскопических систем, т.е. автоматических систем ориентации, навигации и стабилизации (АСОНИС), — сложный процесс. Практическая невозможность экспериментальной оптимизации уже готовой системы требует выбора оптимального решения на ранних стадиях проектирования, причем разработанная система должна удовлетворять заданному уровню эффективности:

$$\Phi \geq \Phi_{зад}. \quad (B.1)$$

Эффективность является комплексной характеристикой АСОНИС и в широком толковании есть мера целесообразности того или иного построения АСОНИС и ее эксплуатации. В инженерной практике эффективность технической системы оценивают через показатели:

- сложности системы  $C$ ;
- обобщенного качества системы  $Q^*$ ;
- эргономичности системы  $M$ ;
- надежности системы  $R$ ;
- обобщенной стоимости системы  $E$ .

Следовательно, эффективность АСОНИС представляют как

$$\Phi = \Phi(C, Q^*, M, R, E). \quad (B.2)$$

Полное выражение эффективности (B.2) не содержит доминирующего показателя и соподчиненности их. Однако это не означает, что соотношение процедур принятия решения при проектировании АСОНИС имеет произвольный характер. Вследствие конечной надежности исходных элементов обеспечение требуемого значения  $R$  возможно только введением избыточности, но для этого необходимо точно знать вероятность безотказной работы нерезервируемого объекта. Поэтому отношение процедур принятия решения по  $M$ - $Q$ -показателям и по  $R$ -показателю есть отношение строгого порядка.

Таким образом, при проектировании АСОНИС, как правило, на первой стадии разработки удовлетворяют показатели  $M$ - $Q$  с использованием всех видов избыточности за исключением структурной избыточности, а затем, используя методы структурного резервирования, обеспечивают заданный уровень  $R$ -показателя. Это во многом объясняется тем, что АСОНИС представляют собой сложные электро-механические системы, поэлементное резервирование в которых осуществить не удается.

Для сопоставления различных вариантов построения систем ориентации, навигации и стабилизации по их надежности использу-

ит следующие показатели надежности:

$P(t)$  - вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до  $t$ , т.е. вероятность того, что в пределах заданного интервала времени отказ в автоматической системе ориентации, навигации и стабилизации не возникнет;

$Q(t)$  - вероятность отказа системы в интервале времени от 0 до  $t$

$$Q(t) = 1 - P(t); \quad (B.3)$$

$T_1$  - среднее время работы объекта до отказа, т.е. математическое ожидание наработки объекта до первого отказа;

$\lambda(t)$  - интенсивность отказа объекта в момент времени  $t$ , т.е. плотность распределения наработки объекта до отказа, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник;

$f(t)$  - плотность распределения отказов объекта, т.е. плотность распределения вероятности того, что время работы объекта до отказа окажется меньше заданного времени работы  $t$ .

#### I. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ НЕРЕЗЕРВИРОВАННЫХ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Расчитать надежность объекта - это значит определить какой-либо из показателей надежности. Для нерезервированного невозстанавливаемого объекта характерно, что отказ любого элемента приводит к отказу всего объекта. Рассмотрим такой объект, состоящий из  $n$  элементов расчета надежности. Раз выход из строя каждого элемента приводит к отказу всего объекта, то объект при расчете надежности можно представить структурно в виде, изображенном на рис. I.1. Для данного объекта можно считать, что отказ элемента - событие случайное и независимое. Объект исправен, если все  $n$  элементов исправны. Поэтому случайное событие, заключающееся



Рис. I.1

в том, что объект исправно работает, есть произведение событий, заключающихся в том, что все элементы исправны.

По теореме о произведении случайных независимых событий имеем

$$P_{об}(t) = \prod_1^n P_i(t). \quad (I.1)$$

Выражая эту формулу через интенсивность отказов, получим

$$P_{об}(t) = \exp\left(-\sum_1^n \int_0^t \lambda_i(t) dt\right). \quad (I.2)$$

Последнее выражение позволяет определить вероятность безотказной работы объекта до его первого отказа. На участке нормальной эксплуатации элементов их  $\lambda_i(t) = \text{const}$ , тогда

$$P_{об}(t) = \exp\left\{-t \cdot \sum_1^n \lambda_i\right\} = \exp\left\{-\lambda_{об} t\right\}, \quad (I.3)$$

где  $\lambda_{об} = \sum_1^n \lambda_i$ .

Таким образом, интенсивность отказа всего объекта равна сумме интенсивностей отказов его элементов.

Эта формула представляет собой запись экспоненциального закона надежности для нерезервируемых невозстанавливаемых объектов. Следовательно, справедливо, что

$$T_{1об} = \frac{1}{\lambda_{об}}, \quad (I.4)$$

т.е. среднее время работы объекта до отказа

$$T_{1об} = \frac{1}{\lambda_{об}} = \frac{1}{\sum_1^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{T_{1i}}}$$

Заметим еще раз, что экспоненциальный закон справедлив для нормального периода работы элементов и для внезапных отказов.

Таким образом:

вероятность безотказной работы нерезервируемого невозстанавливаемого объекта убывает со временем по экспоненциальному закону;

увеличение количества элементов снижает надежность объекта; надежность объекта в сильной мере зависит от надежности входящих в него элементов.

При проектировании расчет надежности можно разделить на ориентировочный (приближенный) и окончательный (уточненный).

Приближенный расчет производится на этапе эскизного проектирования АСОНИС, при определении структурных, кинематических и электрических схем изделия. Этот расчет осуществляется, если известны общее число элементов и показатели надежности аналогичных систем, полученные из опыта эксплуатации.

Для уточненного расчета надежности необходимо иметь данные о реальных режимах работы элементов и об интенсивностях отказов элементов с учетом температурных, электрических, вибрационных и других нагрузок.

## 1.1. Отказы системы

АСОНиС характеризуется электрической схемой и конструкцией. Электрическая схема системы есть совокупность схемных элементов и их соединений, вытекающая из принятого принципа действия системы и функций, выполняемых аппаратурой. Конструкция системы есть совокупность деталей с различными физическими свойствами и формами, находящихся в определенной электрической (в соответствии с принципиальной электрической схемой), пространственной, механической, тепловой, магнитной и энергетической взаимосвязи, обеспечивающая выполнение заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях внешних воздействий и предусматривающая возможность ее повторения в условиях производства.

В эксплуатационных условиях при отказах элементов схемы или утрате конструкции АСОНиС переход системы в целом из работоспособного состояния в неисправное может происходить либо "скачком" (внезапные отказы), либо в результате постепенного непрерывного изменения характеристик элемента (постепенные отказы). Наиболее опасными являются внезапные отказы, так как постепенные отказы могут быть выявлены при правильной организации эксплуатации системы. Вследствие этого в дальнейшем будем рассматривать только внезапные отказы.

Для перебора всех возможных отказов элементов АСОНиС требуется составление бернуллиевой матрицы отказов. Однако по эффекту последствия многие отказы элементов эквивалентны, поэтому при анализе надежности систем вводят понятие элементарной управляющей цепи (ЭУЦ).

Под элементарной управляющей цепью понимают часть электрической схемы и конструкции системы, передающей сигнал только одной координаты управления. Передаваемая координата управления может быть обобщенной координатой.

ЭУЦ может состоять из ряда элементов-блоков (элементов-узлов), поэтому предварительно определяют возможные обобщенные отказы элемента-блока. Наиболее просто и достоверно это осуществляется экспериментально. Изменение характеристик элемента-блока во времени в результате отказа какого-либо простейшего элемента представляет случайный процесс. Однако влияние отказа данного элемента на динамику системы носит строго определенный характер, вследствие этого при моделировании отказов элементов-блоков от-

казы их простейших элементов рассматривают как детерминированные возмущения.

**Пример 1.1.** Определение работоспособности элемента вычислительного устройства АСОНиС - операционного магнитного усилителя при выходе из строя его отдельных элементов.

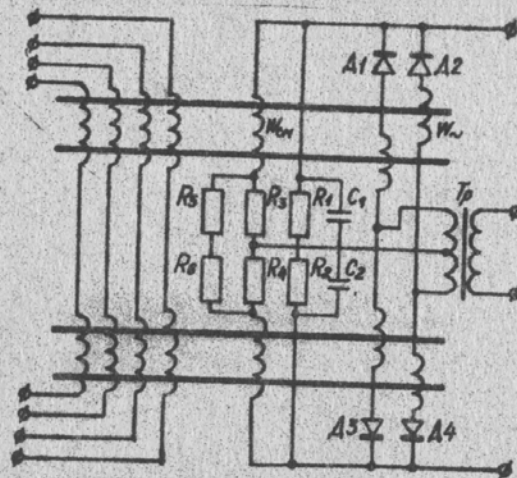


Рис. 1.2

Магнитный усилитель выполнен по двухтактной схеме дифференциального типа с внутренней обратной связью (рис. 1.2). Для усилителя характерны следующие отказы простейших элементов:

- короткое замыкание одного плеча сигнальной обмотки;
- обрыв вторичной обмотки трансформатора;
- обрыв одной из цепей обмоток  $W_m$ ;
- обрыв одного из балластных резисторов  $R_1$  или  $R_2$ ;
- обрыв одного из конденсаторов  $C_1$  или  $C_2$ ;
- обрыв резистора  $R_3$  ( $R_4$ );
- короткое замыкание одного из конденсаторов  $C_1$  или  $C_2$ ;
- обрыв одного из резисторов смещения  $R_5-R_6$  или  $R_5-R_6$ ;
- короткое замыкание одного из плечей обмотки смещения  $W_{cm}$ ;
- короткое замыкание одного из обмоток смещения  $W_{cm}$ ;
- изменение сопротивления резистора смещения на 5, 10% ( $R_3, R_4$ );
- изменение номинала балластных резисторов на 5, 10% ( $R_1, R_2$ );
- уменьшение обратного сопротивления одного из диодов до 1 МОм, 0,5 МОм и 0,3 МОм;

обрыв или короткое замыкание первичной обмотки трансформатора.

Результаты эксперимента:

при коротких замыканиях обмоток  $W_1, W_m$  диодов Д1, Д2, Д3, Д4; конденсаторов С1, С2 возникает ложный сигнал от 10 до 12 вольт и полностью нарушается работа усилителя;

при обрывах одного из двух резисторов смещения - ложный сигнал до 10 В, а при обрыве обмотки смещения одного из плеч - ложный сигнал до 16 В и полностью нарушается работа усилителя;

при обрывах цепей обмоток  $W_1$ , диодов, одного из балластных резисторов, конденсаторов, изменениях обратного сопротивления одного из диодов, изменениях номиналов балластных резисторов смещения изменяется нулевой сигнал от 0,7 до 1,1 В;

обрыв или короткое замыкание обмоток трансформатора приводит к прекращению работы усилителя;

обрыв любого из выходов усилителя приводит к прекращению передачи сигнала по данному входу, а короткое замыкание одного плеча входной обмотки приводит к смещению "нуля" усилителя на 0,1-0,13 В и уменьшению крутизны сигнала на 50%.

Таким образом, отказы простейших элементов усилителя приводят к появлению ложных сигналов, большого и малого, и к отказу типа "обрыв" (прекращение работы усилителя без появления ложных сигналов), т.е. к появлению трех типов отказов усилителя.

Выделение элементарных управляющих цепей в системе удобно проводить по структурной схеме системы с последующим определением элементов схемы и узлов конструкции, составляющих эту ЭУЦ. Отказ такой цепи называют обобщенным отказом системы. Обобщенный отказ ЭУЦ в общем случае может привести или к полному (частичному) прекращению передачи сигнала координаты управления, или к выдаче ложного сигнала данной ЭУЦ. Следовательно, отказы ЭУЦ могут быть двух видов: отказы типа "обрыв" и отказы типа "ложный сигнал". Таким образом, вместо составления бернуллевы матрицы системы при всех возможных отказах простейших элементов достаточно составить матрицу отказов элементарных управляющих цепей, причем, если система состоит из  $n$  элементарных управляющих цепей, то общее число отказов системы

$$N = 2n$$

Это число может быть минимизировано посредством анализа возможных отказов каждой конкретной ЭУЦ. В зависимости от со-

става элементов, образующих ЭУЦ, данная цепь может иметь только один тип отказа. После конкретизации обобщенных отказов составляется таблица отказов системы, общее число которых  $N = 2n - K$ .

Для иллюстрации рассмотрим разложение на ЭУЦ схемы сервопривода автопилота. Эту операцию проведем по структурной схеме сервопривода. Сервопривод является силовой следящей системой. Независимо от принципа работы его элементов структурная схема сервопривода имеет вид,

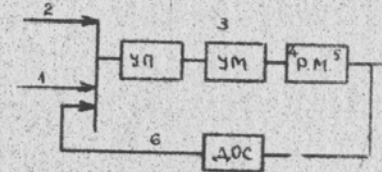


Рис. 1.3

представленный на рис. 1.3. Согласно этому рисунку, в контуре сервопривода можно выделить пять ЭУЦ: цепь входного сигнала, цепь сигнала центровки, прямая цепь контура сервопривода до рулевой машины, цепи рулевой машины и цепь сигнала обратной связи.

В соответствии с выделенными цепями типовыми отказами сервопривода при его любом аппаратном построении являются: обрыв входной цепи (№ 1), обрыв цепи центровки (№ 2), обрыв прямой цепи до рулевой машины (№ 3), обрыв электрических цепей рулевой машины (№ 4), механические отказы рулевой машины (№ 5) и обрыв цепи обратной связи (№ 6).

Отказ № 1 приводит к "потере" управляющего сигнала. Отказ № 2 в зависимости от типа схемы и точки обрыва на этой схеме вызывает появление на входе сервопривода малого или большого ложного сигнала. При отказе № 3 сервопривод прекращает работу. Отказ № 4 вызывает самоход рулевой машины с минимальной или максимальной скоростью. Отказ № 6 в зависимости от типа обратной связи может привести к существенному изменению динамических характеристик сервопривода и даже к потере устойчивости в контуре сервопривода.

Аналогичным образом проводят разложение на ЭУЦ схемы других устройств АСОНиС и определяют их возможные отказы.

Таким образом, отказы АСОНиС эквивалентны отказам ее ЭУЦ.

### 1.2. Приближенный расчет надежности

Надежность можно рассчитать несколькими методами, однако все эти методы основываются на следующих предположениях: элементы в объекте соединены последовательно;

все элементы работают в номинальных режимах и одинаковое время;

интенсивности отказов элементов не зависят от времени; отказы элементов взаимно независимы.

Точность расчета определяется в основном достоверностью исходных данных.

Проведение приближенного расчета надежности позволяет: выбрать элементы;

определить ориентировочную оценку ожидаемого уровня надежности разрабатываемого изделия;

провести сравнительный анализ различных вариантов структур АСОНиС и выбрать оптимальную структуру.

Наиболее распространенными методами проведения приближенного расчета надежности являются следующие:

по среднегрупповым интенсивностям отказов элементов;

коэффициентный;

с использованием данных эксплуатации.

Расчет надежности по среднегрупповым интенсивностям отказов

проводится по известным:

типам элементов;

интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$ ;

количеству элементов, входящих в систему.

Учет эксплуатационных условий сводится к выбору элементов, способных работать в заданных условиях эксплуатации.

Расчет выполняется в следующем порядке:

все элементы системы разбивают на несколько групп  $n$  с примерно одинаковыми интенсивностями отказов  $\lambda_i$  внутри каждой  $i$ -й группы и подсчитывают ориентировочное количество элементов в каждой группе  $N_i$ ;

по таблицам находят средние значения интенсивностей отказов элементов каждой группы  $\lambda_{i,j}$ ;

вычисляют произведение  $N_i \lambda_{i,j}$ ;

рассчитывают общую интенсивность отказов системы по всем  $n$  группам элементов

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_i N_i \lambda_i;$$

определяют наработку на отказ

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_i N_i \lambda_i};$$

находят вероятность безотказной работы системы за время  $t$

$$P_{\Sigma}(t) = \exp\left\{-t \sum_i N_i \lambda_i\right\}. \quad (I.5)$$

При малых значениях  $\frac{t}{\sum_i N_i \lambda_i}$  удобно воспользоваться приближенной формулой

$$P_{\Sigma}(t) \approx 1 - t \cdot \sum_i N_i \lambda_i. \quad (I.6)$$

Коэффициентный метод расчета надежности. Когда отсутствуют точные знания зависимости интенсивности отказов всех элементов от режимов их работы, применяют данный метод расчета надежности АСОНиС летательных аппаратов. В этом методе используют коэффициенты, связывающие интенсивности отказов элементов различных типов с интенсивностью отказов элемента с известными характеристиками. В основу метода положены следующие допущения:

— справедлив экспоненциальный закон надежности;

— отказы являются событиями случайными и независимыми;

—  $\lambda_i = \text{const}$ ;

интенсивности отказов всех элементов аппаратуры изменяются от условий эксплуатации в одинаковой степени.

Тогда

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_0} = K_i = \text{const}, \quad (I.7)$$

где  $\lambda_0$  — интенсивность отказа элемента с достоверно известными количественными характеристиками надежности;

$K_i$  — коэффициент надежности  $i$ -го элемента.

Элемент с интенсивностью отказа  $\lambda_0$  называется основным элементом расчета надежности. С учетом коэффициента надежности

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_0 \sum_i N_i K_i, \quad (I.8)$$

$$T_{\Sigma} = \frac{1}{\lambda_0 \sum_i N_i K_i} = \frac{T_0}{\sum_i N_i K_i}; \quad P(t) = \exp\left\{-t \lambda_0 \sum_i N_i K_i\right\}, \quad (I.9)$$

где  $T_0$  — среднее время наработки на отказ основного элемента.

Таким образом, для вычисления количественных характеристик надежности аппаратуры достаточно знать только коэффициенты надежности  $K_i$ , число элементов аппаратуры  $N_i$  и интенсивность отказов основного элемента  $\lambda_0$ .

При вычислении коэффициентов надежности, как правило, за основной элемент расчета надежности принимают резисторы, причем

интенсивность отказа основного элемента определяют как средневзвешенное значение интенсивности отказов резисторов, применяемых в проектируемой аппаратуре, т.е.

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} N_{i,j}}{m} \quad (I.10)$$

где  $\lambda_{i,j}$  и  $N_{i,j}$  — интенсивности отказов и количество резисторов  $i$ -го типа и  $j$ -го номинала;  
 $m$  — число резисторов.

Целесообразно вероятность безотказной работы рассчитывать для максимальных и минимальных значений  $K_i$  и по результатам расчета строить графики  $P(t, \lambda_0)$ . Эти зависимости определяют не только надежность системы, но и ошибки в вычислении вероятности безотказной работы, которые появились за счет ошибок в определении коэффициентов надежности элементов. Можно гарантировать, что ошибка в вычислении  $P(\lambda_0 t)$  не будет превышать разности между максимальными и минимальными значениями  $P(\lambda_0 t)$ . При изменении условий работы в силу принятых допущений можно утверждать, что в выражении (I.8) будет меняться только интенсивность отказов основного элемента. Это означает, что зависимость  $P(\lambda_0 t)$  не изменяется, а изменяется только масштаб кривых на оси абсцисс. Это изменение можно определить, если известны зависимости интенсивности отказов  $\lambda_0$  от условий работы. Таким образом, зависимости  $P(\lambda_0 t)$ , вычисленные при  $K_{i \min}$  и  $K_{i \max}$ , фактически строятся для широкого диапазона условий эксплуатации.

Расчет надежности коэффициентным методом рекомендуется вести по блокам и строить кривые  $P(\lambda_0 t)$  для всех блоков системы. Это позволяет выявить "слабые места" и определить пути повышения надежности проектируемой системы.

Коэффициентный метод позволяет:

с хорошей точностью сравнивать надежности систем и их отдельных элементов при ограниченных данных по надежности элементов;

пересчитывать количественные характеристики надежности при изменении режимов работы аппаратуры;

оценивать надежность систем проектируемых на новых элементах.

Расчет надежности с использованием данных эксплуатации.

В ряде случаев при ориентировочном расчете надежности можно использовать данные о надежности аналогичного по типу объекта, по-

лученные при эксплуатации. Это позволяет учесть на этапе эскизного проекта влияние на надежность проектируемого объекта реальных условий эксплуатации. При этом возможно использовать 2 основные метода расчета:

- по среднему уровню надежности однотипной аппаратуры;
- по коэффициенту пересчета к реальным условиям эксплуатации.

Первый метод применим при расчете надежности объекта, у которого имеется соответствующий аналог по структуре составляющих элементов, их типу и режимам работы, схемным и конструктивным решениям, условиям их эксплуатации. В этом случае удобно пользоваться средней интенсивностью отказов элементов, которая выражается отношением интенсивности отказов системы к общему числу различных элементов, входящих в систему.

При экспоненциальном законе надежности

$$\lambda_{cp} = \frac{\sum \lambda}{N} = \frac{1}{T_{1A} \cdot N} \quad (I.11)$$

Этот показатель не следует смешивать с интенсивностью отказов элементов определенного типа, так как в данном случае усреднение проводилось по всем разнородным элементам системы. Характерной особенностью  $\lambda_{cp}$  является ее постоянство для аппаратуры определенного назначения независимо от числа ее элементов. В основе метода лежит предположение, что средние интенсивности отказов  $\lambda_{cp}$  проектируемого объекта и аналога равны:

$$\lambda_{cp} = \frac{1}{N_A T_{1A}} = \frac{1}{N_n T_{1n}} \quad (I.12)$$

где  $N_A, N_n$  — количество элементов соответственно в объекте-аналоге и проектируемом объекте;

$T_{1A}, T_{1n}$  — наработка на отказ соответственно объекта-аналога и проектируемого объекта.

Для расчета надежности с использованием данного метода должны быть известны  $T_{1cp}$ ,  $N_A$  и  $N_n$ . Тогда ожидаемая наработка на отказ проектируемого объекта

$$T_{1n} = \frac{N_A}{N_n} \cdot T_{1A} = \frac{1}{N_n \lambda_{cp}} \quad (I.13)$$

Количество элементов проектируемой аппаратуры на начальном этапе ее проектирования может быть найдено по количеству и удельному часу типовых элементов в структуре объекта, при этом структура проектируемого объекта должна уточняться на основе анализа



структуры объекта-аналога.

Достоинством метода является его простота и то, что при расчете не требуется данных об интенсивности отказов элементов различных типов и их количество в каждой группе.

К недостаткам следует отнести ограниченность его применения в связи с тем, что для новой разрабатываемой аппаратуры не всегда удается найти подходящий по составу, типу и условиям применения аналог.

Второй метод расчета надежности с использованием данных, полученных при эксплуатации, заключается в том, что рассчитанные по таблицам интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$  проектируемой аппаратуры приводятся к реальным условиям эксплуатации посредством коэффициентов пересчета.

При расчете должны быть известны:  
интенсивности отказов элементов  $\lambda_i$ ;  
количество элементов каждого типа в проектируемой аппаратуре  $N_{ai}$ ;  
количество элементов каждого типа в объекте-аналоге  $N_{ai}$ ;  
фактическая наработка на отказ существующей аналогичной аппаратуры  $T_{ia}$ , определяемая статистическими данными, полученными при эксплуатации.

В данном случае требования к выбору объекта-аналога не являются столь жесткими, как в первом методе. Главным требованием является идентичность условий эксплуатации и однородность проектируемого объекта и объекта-аналога.

Расчет проводится в следующем порядке:  
наработка на отказ аппаратуры, выбранной в качестве аналога

$$T_{ia} = \frac{1}{\sum_{i=1}^K N_{ai} \lambda_i} \quad (I.14)$$

где  $K$  - количество групп элементов,  
коэффициент пересчета

$$\eta = \frac{T_{ia}}{T_{ia}} \quad (I.15)$$

ожидаемая наработка на отказ проектируемого объекта при тех же табличных значениях  $\lambda_i$ , но для иного количества элементов в группах; в результате перемножения полученного значения на коэффициент пересчета наработка на отказ с учетом реаль-

ных условий эксплуатации

$$T_{in} = \frac{t}{\sum_{i=1}^K N_{ai} \lambda_i} \quad (I.16)$$

В заключение отметим, что приближенные методы расчета предназначены главным образом для определения ожидаемой надежности работы проектируемого объекта.

### I.3. Уточненный расчет надежности

Этот расчет производится на этапе технического проектирования по опытному образцу, когда известны реальные режимы работы всех элементов, определяющие конструктивное оформление объекта и условия его эксплуатации.

В отличие от приближенного при уточненном расчете надежности объекта интенсивность отказов элементов должна выбираться с учетом реальных режимов их работы  $\lambda_i(v)$ . Расчет следует проводить по блокам или узлам, конструктивно оформленным в одно целое, по тем же формулам, что и приближенный расчет; при этом составляется табл. I.I. Сопоставление результатов уточненного расчета с требуемыми по ТТЗ показателями надежности определяет пути повышения уровня надежности узлов, блоков и общей надежности системы с учетом различных факторов. Характерной особенностью АСОНИС является то, что ее отдельные агрегаты работают не одновременно. Поэтому вероятность безотказной работы объекта в течение времени  $\Delta t$  рассчитывается по следующей формуле:

$$P(t) = \prod_{i=1}^K P_i(\Delta t_i) \quad (I.17)$$

где  $P_i(\Delta t_i)$  - вероятность безотказной работы  $i$ -го агрегата в течение времени  $\Delta t_i$ ;

$\Delta t_i$  - время непрерывной работы  $i$ -го агрегата.

По предположению для всех блоков системы справедлив экспоненциальный закон надежности:

$$P_i(\Delta t_i) = \exp\{-\lambda_i(v) \Delta t_i\} \quad (I.18)$$

Тогда для расчета вероятности безотказной работы объекта на интервале времени от 0 до  $t$  получим следующее выражение:

$$P(t) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^K \lambda_i(v) \Delta t_i\right\} \quad (I.19)$$

Таблица I.1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Наименование и тип элементов											
Схемное обозначение элементов											
$n$											
$K_H$											
$\theta^c$											
$\lambda_{\text{н.н.}}$ $\times 10^6$ 1/ч											
$a_t$											
$K_b$											
$\lambda_p$ или $\lambda_p = \lambda_{\text{о.а.}}$ $\times 10^6$ 1/ч											
$\lambda \cdot \lambda_{\text{р.к}}$ $\times 10^6$ 1/ч											
Рабочая интенсивность отказов элементов											

Пусть агрегаты, составляющие объект, работают следующим образом: агрегат 1 - непрерывно, агрегат 2 - от 0 до  $t_1$ , агрегат 3 - от  $t_1$  до  $t_2$  и т.д. (рис. I.4).

В результате построения кривых вероятности безотказной работы каждого агрегата и объекта в целом можно видеть, что кривая вероятности безотказной работы объекта отличается от экспоненты.

Поэтому среднее время работы объекта до отказа необходимо определять по общей формуле

$$T_1 = - \int_0^{\infty} t \cdot P'(t) dt. \quad (I.20)$$

Вычисление интеграла целесообразно проводить по участкам от 0 до  $t_1$ , от  $t_1$  до  $t_2$  и т.д.

Другие показатели надежности необходимо также рассчитывать по общим формулам. Так, интенсивность отказов объекта с неодновременно работающими агрегатами следует рассчитывать по формуле

$$\lambda(t) = - \frac{P'(t)}{P(t)}. \quad (I.21)$$

## 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ АСОНИС

Основные методы повышения надежности гироскопических АСОНИС связаны с применением различных видов избыточности и с применением контроля, настроек, регулировок и устранением отказов при эксплуатации системы.

Под избыточностью понимают наличие дополнительных средств или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Основным методом введения избыточности является резервирование. Все многообразие возможных методов резервирования можно представить следующими видами: параметрическое, режимное, временное, функциональное, информационное и структурное резервирование. Применение того или иного вида избыточности диктуется принятым вариантом построения гироскопической АСОНИС и способом ее технической реализации.

Режимное резервирование - метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование схемных элементов в недо-

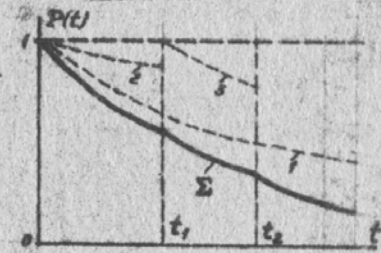


Рис. I.4

груженном режиме с коэффициентами нагрузки не более  $K_n = 0,5 + 0,8$ . Это аналогично созданию запасов прочности в машиностроении и строительстве. Снижение нагрузки до 50% от номинальной снижает интенсивность отказов радиоэлектронных деталей в среднем в 2-5 раз, а в некоторых случаях и более. Режимное резервирование на практике используется при построении электрических схем гироскопических систем, особенно в вычислительных устройствах навигационных систем и автоматов стабилизации. Однако введение режимной избыточности приводит к увеличению массы объекта, его габаритов, стоимости, поскольку используются элементы, рассчитанные на большую нагрузку.

Временное резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени. Этот метод трудно реализовать в системах аналогового типа, т.е. в непрерывных системах. В дискретных (цифровых) системах благодаря разделению времени и последовательному решению отдельных задач временная избыточность используется для проверки решения. Обычно выходная информация гироскопических систем о цифровым вычислительным устройством формируется в результате трехкратного расчета по одному и тому же алгоритму с сопоставлением полученных значений выходного сигнала, например, по мажоритарному принципу (принцип "голосования").

Параметрическое резервирование — метод повышения надежности объекта путем оптимального выбора параметров системы. При проектировании гироскопических систем в первую очередь должно быть обращено внимание на выбор наиболее простых схем и конструкций узлов объекта. Это диктуется тем обстоятельством, что приближенно вероятность отказов объекта прямо пропорциональна количеству элементов. Параметрическое резервирование неразрывно связано с увеличением стабильности работы объекта. Известно, что основное влияние на изменение параметров объекта оказывают механические, климатические, радиологические и биологические факторы.

Для уменьшения отрицательного влияния механических воздействий на надежность гироскопических объектов на практике получили распространение три основных метода: амортизация, повышение механической прочности и жесткости деталей и узлов, обволакивание и заливка.

Амортизация — подвеска прибора на корпусе летательного аппарата на амортизаторах упругого типа — широко используется для

виброзащиты агрегатов гироскопических систем.

Повышение механической прочности и жесткости имеет большое практическое значение для агрегатов, которые не могут быть амортизированы, и различных оснований приборов, плат, кронштейнов и т.д.

Заливка и обволакивание характерны для механической защиты отдельных блоков и элементов объектов, содержащих большое количество радиоэлементов, например вычислительных устройств навигационных систем. Заливка узлов органическими смолами и т.п., а также приклеивание и обволакивание в сочетании с применением печатного монтажа используют достаточно широко как средство повышения жесткости конструкции. После заливки совокупность радиоэлементов становится единой механически прочной конструкцией. Недостатком такого узла является его неремонтопригодность.

Существует четыре основных направления уменьшения температурных воздействий на надежность агрегатов гироскопических систем: сужение пределов изменения температуры; увеличение надежности работы объекта в условиях охлаждения и перегревов; повышение температурной стабильности параметров объекта; использование дискретных принципов построения агрегатов навигационных систем и автоматов стабилизации, обеспечивающих малое влияние нестабильности параметров объекта на конечный результат.

При испытаниях конденсаторов было установлено так называемое "правило 10°C": увеличение окружающей температуры на каждые 10°C (в пределах рабочего диапазона) вызывает уменьшение срока службы на 50%. Принципиально существуют три способа уменьшения пределов изменения температуры: подогрев элементов и узлов объектов для устранения отрицательного действия низких температур; устранение перегрева аппаратуры, вызываемого выделением тепла самими агрегатами системы, путем использования различных способов охлаждения; стабилизация температурных условий с помощью термостатов.

Очень важной задачей является устранение перегревов. Стремление уменьшить массу и габариты объектов ухудшает их тепловой режим. Для уменьшения действия перегревов улучшают энергетические показатели элементов и применяют охлаждение агрегатов. Применение полупроводниковых приборов и микросхем позволило уменьшить рассеиваемую мощность.

Наиболее простой системой охлаждения является естественное охлаждение за счет теплопроводности, конвекции воздуха и луче-

испускание. С этой целью используют теплопроводящие основания и экраны для источников тепловой энергии, а также создание вентиляционных окон, жалюзей и отверстий в кожухе прибора. Зависимость перегрева от площади охлаждения для кожуха без вентиляции и кожуха с жалюзей и отверстиями изображена на рис. 2.1. Однако

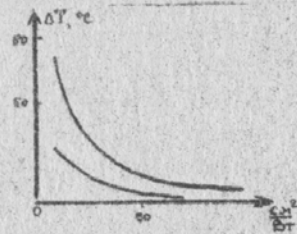


Рис. 2.1

необходимо иметь в виду, что в условиях разреженной атмосферы и невесомости прекращается теплообмен за счет конвекции воздуха, что существенно снижает эффективность естественного охлаждения. Поэтому в некоторых особо важных случаях используют искусственное охлаждение.

Эффективным методом повышения температурной стабильности является термостатирование. Однако оно применяется только в тех случаях, когда требования к изменению температуры очень жесткие, поскольку при использовании термостатирования существенно увеличиваются масса и габариты приборов и требуется значительное время для установления рабочего режима стабильной температуры.

Среди других методов повышения стабильности работы приборов в условиях изменения температуры окружающей среды следует отметить такие, как подбор материалов с возможно меньшей разницей их коэффициентов линейного расширения; применение деталей и узлов (сборных соединений) с возможно меньшими температурными изменениями их параметров; использование специальной окраски и т.д.

В зависимости от разновидности конструкций, входящих в объект агрегатов, существуют следующие основные методы их защиты от влияния влажности:

механические конструкции, которые при длительном воздействии влаги подвергаются коррозии, изготавливаются из антикоррозионных материалов или имеют защитные покрытия;

механизмы, которые подвержены коррозии, изготавливаются из специально подобранных материалов и, как правило, имеют кожухи с защитным покрытием;

платы монтажа, которые при длительном воздействии влажности изменяют свои изоляционные свойства, изготавливают из влагостойких изоляционных материалов и защищают его слоем лака или смолы;

в некоторых случаях используют осушающие агенты (влагопоглотители), например силикагель  $SiO_2$ .

Радиоэлементы: конденсаторы, резисторы, переключатели и т.п. — целесообразно объединять в функциональные блоки и заливать влагостойкими компаундами или смолами. В ряде случаев применяют герметизацию приборов. Однако герметизация увеличивает массу и габариты, поэтому ее следует применять только в тех системах, в которых другие методы не дают эффекта.

Радикальным средством защиты объектов от влияния падения атмосферного давления и от вакуума является герметизация прибора с заполнением внутреннего объема нейтральным газом — азотом, смесью водорода с гелием.

Основная защита приборов от влияния пыли — применение пыленепроницаемых корпусов, а от проникающей радиации — экранирование с одновременной герметизацией приборов; от биологических факторов — механическая защита (специальный подбор материалов, спецлаки и использование покрытий, в состав которых введены ингибиторы).

Совокупность вышеперечисленных конструкторских мер позволяет существенным образом повысить стабильность работы гироскопических систем в целом.

Функциональное резервирование — способ повышения надежности путем замены отказавших объектов более интенсивной работой других объектов, которые до появления отказов выполняли иные функции. Этот тип резервирования в гироскопических системах используется наиболее часто в автоматах стабилизации для пилотируемых летательных аппаратов. В таких системах при отказах сервопривода автомата стабилизации обеспечивается возможность продолжения выполнения маневра вручную по командам директорной системы, т.е. летчик, выполняя команды директорной системы, резервирует сервопривод автомата стабилизации.

Информационное резервирование — метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации. Создание избыточной информации в АСОНИС обеспечивается, как правило, структурным резервированием датчиков первичной информации.

### 3. СТРУКТУРНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ

#### 3.1. Основные понятия

Структурное резервирование состоит в применении избыточного количества идентичных элементов для выполнения одной и той же функции. Обычно в нерезервированном варианте АСОНиС не удается обеспечить требуемый уровень безотказности. В резервированной же системе отказ одного или нескольких элементов не приводит к отказу системы в целом.

В любой резервированной системе можно выделить:

основной элемент структуры объекта, минимально необходимый для обеспечения его работоспособности;

резервный элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Кратность резервирования  $K$  – отношение числа резервных элементов к числу основных. При  $K = 1$  – однократное резервирование, т.е. дублирование; при  $K > 1$  – многократное резервирование. Так,  $K = 2$  соответствует триплированной системе, а  $K = 3$  – квадруплексированной системе.

Отказность объекта называют минимальное количество отказов элементов объекта, которое соответствует отказу резервируемой системы в целом.

Отказом резервированной системы является последовательность отказов ее элементов, после наступления которой происходит нарушение работоспособности системы.

На этапе предварительных расчетов вероятности безотказной работы системы  $P_c(t)$  целесообразно пользоваться понятием порядка отказа, т.е. числом отказов элементов в конкретной реализации обобщенного отказа резервированного объекта. Минимальный порядок отказа резервированной системы представляет собой отказность системы  $\tau$ . Приближенно отказность объекта связана с вероятностью отказа следующим соотношением:

$$Q_{don}(t) \approx \left( \frac{\Delta t}{T_i} \right)^\tau, \quad (3.1)$$

из которого нетрудно получить величину минимально допустимого среднего времени работы системы до отказа:

$$T_{i, \min} \approx \frac{\Delta t}{\sqrt[\tau]{Q_{don}}} \quad (3.2)$$

Полагая  $Q_{don} = 10^{-7}$ , можно определить минимально допустимое значение  $T_i$   $n$ -канала стабилизации в зависимости от значений  $\Delta t$  и  $\tau$  (табл. 3.1).

Таблица 3.1

$\Delta t, \tau$	$T_{i, \min}, \tau$			
	$\tau = 1$	$\tau = 2$	$\tau = 3$	$\tau = 4$
10	$10^6$	$31,6 \cdot 10^3$	2150	562
5	$5 \cdot 10^7$	$15,8 \cdot 10^3$	1075	281
1	$1 \cdot 10^7$	$3,16 \cdot 10^3$	215	56,2
0,5	$5 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^3$	108	28,1
0,05 (3 мин)	$5 \cdot 10^5$	$0,158 \cdot 10^3$	10,8	2,81
0,0083 (30 с)	$83,3 \cdot 10^3$	$0,0264 \cdot 10^3$	1,8	0,47
0,005 (18 с)	$5 \cdot 10^4$	$0,0158 \cdot 10^3$	1,08	0,28

Таким образом, чтобы удовлетворить  $Q(t) \leq Q_{don}$  например, в течение 10 ч работы, необходимо применять 4-отказную систему. Однако эта оценка, хотя и полезная, но приближенная, поскольку не учтены система встречного контроля и возможность отключения неисправного элемента АСОНиС.

#### Вид резервирования и резерва

Постоянное резервирование – резервирование, при котором резервные объекты (РО) участвуют в функционировании объекта наравне с основными (рис. 3.1) объектами (ОО).

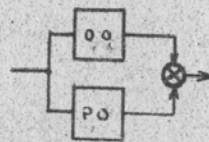


Рис. 3.1

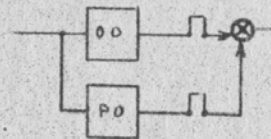


Рис. 3.2

Резервирование замещения – резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента (рис. 3.2).

При постоянном резервировании резервные элементы присоединены к основным в течение всего времени работы и находятся в одинаковом с ними режиме. Этот метод является единственно возможным в системах, где недопустим даже кратковременный перерыв

в функционировании АСОУТС, необходимый для перехода с основного элемента на резервный. Система с постоянным резервированием проектируется таким образом, чтобы отказ одного или даже нескольких элементов не влиял на ее характеристики. В таких системах элементы соединены постоянно, перестройки схемы при отказах не происходит и вышедший из строя элемент не отключается. Поэтому при создании систем с таким резервированием приходится учитывать последствия, к которым может привести отказ элемента.

Достоинство этого метода — простота реализации и отсутствие каких-либо перерывов в работе.

Недостатками метода являются:

- повышенный расход ресурса резервных элементов;
- выход из строя одного из элементов приводит к изменению выходных сигналов резервируемой системы;
- имеется общая точка в структуре системы, например суммирующее устройство, которое должно обладать высокой надежностью.

При резервировании замещением система проектируется таким образом, что при появлении отказа элемента она перестраивается и восстанавливает свою работоспособность путем замещения отказавшего элемента резервным. С этой целью в таких системах используются специальные переключающие устройства для отключения отказавшего элемента и включения резервного.

Резервирование замещением позволяет создавать системы меньших масс и габаритов, чем при постоянном резервировании, но требует перерывов в работе системы, необходимых для перехода с основного на резервный элемент. Естественно, что к устройствам, контролирующим работоспособность объекта, предъявляются с точки зрения надежности жесткие требования. Их надежность должна быть по крайней мере на порядок выше надежностей узлов и агрегатов системы. Это необходимо учитывать при их проектировании. Кроме того, необходимо, чтобы быстродействие блоков было меньше допустимого времени прерывности процесса ориентации или управления.

При резервировании замещением различают 3 вида условий работы резервных элементов.

**Нагруженный, или "горячий", резерв.** Резервный элемент, находящийся в том же рабочем режиме, что и основной элемент, т.е. внешние условия резерва полностью совпадают с условиями, в которых работает основная аппаратура. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения системы. Вероятность

безотказной работы резервированной аппаратуры в этом случае не зависит от того, в какой момент времени она включается в работу.

**Облегченный, или "теплый" резерв.** Резервный элемент, находящийся в менее нагруженном состоянии, чем основной, т.е. внешние условия резерва до момента его включения в работу облегчены. Ресурс резервных элементов начинает расходоваться с момента включения всей системы в работу, однако интенсивность расхода ресурса резервной аппаратуры до момента ее включения вместо отказавшей значительно ниже, чем в обычных рабочих условиях.

Вероятность безотказной работы резервных элементов зависит от момента включения в работу и от того, насколько отличаются законы распределения вероятности безотказной работы элементов в рабочих и резервных условиях.

**Ненагруженный, или "холодный" резерв.** Резервный элемент практически не несет нагрузок, т.е. внешние условия резерва настолько облегчены, что их ресурс практически начинает расходоваться только с момента включения их в работу. Плотности распределения отказов системы при различных состояниях резерва условно показаны на рис. 3.3.

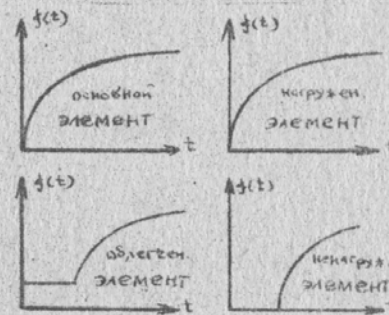


Рис. 3.3

**Достоинства резервирования замещением:**

- при данном методе не требуется регулировка аппаратуры после замещения отказавшего элемента резервным;

- резервные элементы могут находиться в ненагруженном состоянии.

**Недостатки метода:**

- при данном методе резервирования необходима прерывность процесса управления;

- эффективность по  $R$  — показателю системы определяется своевременным переключением отказавшего элемента на резервный, что требует дополнительно переключающих устройств, системы непрерывного контроля работоспособности основных элементов.

**Схема включения резерва.** Методы резервирования могут быть осуществлены путем применения общего, отдельного и смешанного соединения резервных элементов.

Общее резервирование - резервирование, при котором резерв предусматривается на случай отказа объекта в целом. Благодаря простоте реализации этот способ очень распространен.

Однако в случае автопилота (АП) этот метод требует, чтобы летательный аппарат имел "разрезные" рули, т.е. чтобы каждый автономный канал АП работал на свою управляющую плоскость. В противном случае будет одна общая суммирующая "точка", т.е. нерезервированный элемент (рис. 3.2).

Раздельное резервирование состоит в резервировании системы по отдельным участкам (рис. 3.3), т.е. резерв предусматривается на случай отказов отдельных элементов или их групп. Если резервируются элементы, то резервирование называется поэлементным.

Смешанное резервирование - в системе резервируются как отдельные блоки, так и отдельные элементы.

Определим в общем виде вероятность безотказной работы системы при различных схемах включения резерва.

Общее резервирование. Отказ типа "обрыв"

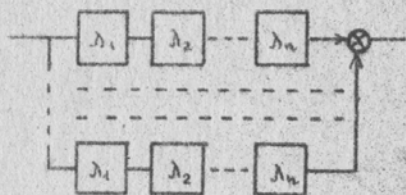


Рис. 3.4

Пусть система состоит из  $n$  элементов, которые характеризуются соответствующими интенсивностями отказов  $\lambda_i$ , и пусть имеется  $m$  таких систем (рис. 3.4). Тогда вероятность безотказной работы "цепи" равна:

$$F_{ij}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad j=1 \dots m, \quad i=1 \dots n;$$

вероятность отказа:

$$q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Система откажет тогда, когда откажут все  $m$  "цепей". Следовательно,

$$Q_{op}(t) = \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)], \quad (3.3)$$

$$P_{op}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{i=1}^n P_i(t)]. \quad (3.4)$$

Если вероятности безотказной работы каждой "цепи" одинаковы, что обычно и бывает, то

$$P_{op}(t) = 1 - [1 - P_{ij}^n(t)]^m, \quad (3.5)$$

$$Q_{op}(t) = [1 - P_{ij}^n(t)]^m \quad (3.6)$$

Раздельное резервирование. Отказ типа "обрыв"

Рассмотрим систему с раздельным резервированием. Вероятность отказа  $j$ -й группы элементов

$$Q_{rj}(t) = \prod_{i=1}^m q_{ij}(t) = \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)];$$

тогда вероятность безотказной работы

$$P_{rj}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)].$$

Для всей системы

$$P_{pp}(t) = \prod_{j=1}^m \{1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)]\} \quad (3.7)$$

и

$$Q_{pp}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m \{1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)]\}. \quad (3.8)$$

Если  $\lambda_i$  всех элементов одинаковы, то

$$P_{pp}(t) = \{1 - [1 - P(t)]^m\}^n, \quad (3.9)$$

$$Q_{pp}(t) = 1 - \{1 - [1 - P(t)]^m\}^n.$$

Из выведенных выражений следует, что:

можно создать систему с высоким уровнем безотказности из малонадежных элементов;

сложная система не подчиняется экспоненциальному закону надежности;

поэлементное резервирование выгоднее общего.

Пример 3.1. Пусть  $n=50$ ,  $m=2$ , причем  $P_i=0,9$ . Тогда

$P_{nc}(t)=0,005$ ;  $P_{op}(t)=0,01$  и  $P_{pp}(t)=0,6$ , т.е.  $P_{pp}(t)$  в 60 раз больше по отношению к  $P_{op}(t)$  и в 120 раз - к  $P_{nc}(t)$ .

Введение структурной избыточности всегда связано с увеличением сложности, массы, габаритов и стоимости системы. И хотя это пока единственный способ создания надежной системы из ненадежных элементов, все же, учитывая жесткие требования к массе и габаритам АСОНиС для летательных аппаратов, на практике применяют, как правило, не более трехкратного резервирования элементов ( $K \leq 3$ ).

Наибольшее распространение получило смешанное резервирование, при котором совмещаются различные виды резервирования в од-

ном объекте.

Резервирование с применением логического устройства позволяет частично избежать недостатков, свойственных постоянному резервированию. Применение не более трехкратного резервирования в АСОНиС требует для нормального функционирования системы в целом при отказе отдельных ее элементов их локализацию. С этой целью применяют логические схемы, обеспечивающие неизменность выходного сигнала системы при отказах ее элементов.

### 3.2. Восстанавливающие органы в АСОНиС<sup>ж)</sup>

При эксплуатации многих типов АСОНиС предъявляется требование, исключающее даже кратковременное прекращение их функционирования. Поэтому в таких системах применяется метод постоянного резервирования. Эффективность такого резервирования достигается только тогда, когда отказ одного из параллельно включенных одинаковых объектов не вызывает недопустимого искажения выходного сигнала АСОНиС в целом. Это обеспечивается включением на выходе взаимно резервирующих друг друга объектов специального органа, формирующего достоверный выходной сигнал, как при исправной работе всех устройств, так и при случайных отказах некоторых из них. Этот орган, представляющий собой логическое устройство, обладающее способностью распознать сигналы отказавших объектов и исключить их влияние на формирование выходного сигнала, называется восстанавливающим органом (ВО).

На рис. 3.5 показано резервное соединение объектов, преобразующих входной сигнал  $X(t)$  в выходной сигнал  $Y(t)$ . Предположим, что вероятность отказа ВО равна нулю ( $q_{в.о}(t) \approx 0$ ), вероятность отказа резервируемого объекта будет

$$Q_{об}(t) = \prod_1^n q_i(t),$$

где  $q_i(t)$  - вероятность отказа нерезервируемого объекта. Это соотношение справедливо при условии, что ВО обеспечивает правильную работу системы при работоспособности хотя бы одного из нерезервируемых объектов.

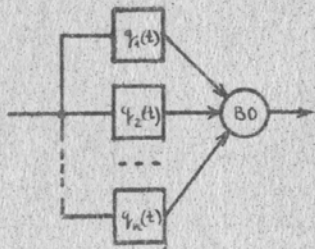


Рис. 3.5

Предположим для примера, что каждый из нерезервируемых объектов представляет собой датчик скоростного напора (ДСН), сигналы которого используются в АСОНиС. Выходной величиной датчика является напряжение постоянного тока, пропорциональное динамическому воздушному давлению.

Пусть датчик сконструирован таким образом, что при любом возможном его отказе выходное напряжение отказавшего датчика оказывается равным нулю. При этом условии рационально применить ВО, реализующий логическую функцию выделения максимального из выходных сигналов отдельных датчиков:

$$Y_{в.о}(t) = \max [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]. \quad (3.10)$$

Если ВО обладает предельно высокой надежностью, характеризуемой вероятностью отказа, равной нулю, то резервированная система правильно функционирует при исправности хотя бы одного ДСН. При вероятности отказа одного ДСН  $q_i(t) = 0,01$  вероятность отказа системы из трех датчиков ( $n=3$ ) равна  $q_{р.с}(t) = 10^{-6}$ . Пусть в длительном полете ЛА используется система, состоящая из трех ДСН с ВО. Зависимость скоростного напора от времени представлена на рис. 3.6.

Пусть в момент времени  $t_1$  отказал датчик  $N=2$ , а в момент времени  $t_2$  произошел отказ датчика  $N=3$ . ВО, выделяющий максимальный сигнал из показаний трех датчиков, обеспечивает достоверную информацию о скоростном напоре в течение всего полета. Если не заменить или не восстановить работоспособность

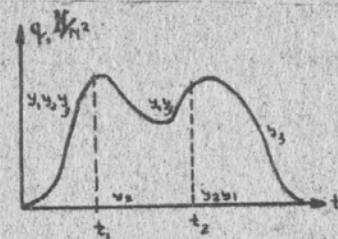


Рис. 3.6

отказавших датчиков, то в следующем полете работоспособным будет только один датчик, при отказе которого произойдет полный отказ резервированной системы соединения. Для определения работоспособности и правильного функционирования бортовых устройств перед полетом и в полете служат средства автоматизированного встроенного контроля, содержащие устройства обнаружения, сигнализации и индикации отказавшего объекта.

Таким образом, восстанавливающие органы и устройства обнаружения отказов являются обязательными составными частями резервированных систем.

<sup>ж)</sup> Разделы 3.2 и 3.3 написаны доц. В.Н.Гласко.



Резервирование на триплексном уровне, т.е. применение трех независимо работающих каналов, далеко не всегда может обеспечить работоспособность системы после отказа второго канала, представленный пример иллюстрирует скорее предельные возможности снижения вероятности полного отказа системы.

Определяющим для формирования логической структуры ВО являются характеристики возможных отказов. Каждый восстанавливающий орган обеспечивает нормальную работу резервированной системы до возникновения определенного количества отказов. При работе резервированной системы с идеальным в смысле надежности восстанавливающим органом, входными величинами которого является  $n$  выходов одинаковых каналов, возникновение  $m$  отказов определяется выражением

$$q_{PC}(t) = C_n^m q^m(t) \cdot P^{n-m}(t), \quad (3.11)$$

где  $P(t)$  - вероятность безотказной работы канала ( $P(t) = 1 - q(t)$ ), а  $C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$  - число сочетаний.

Для определения оптимального количества восстанавливающих органов условно представим каждый из трех объектов состоящим из  $l$  одинаковых в смысле надежности элементов. Для упрощения условно будем считать, что вероятность отказа каждого элемента равна вероятности отказа ВО, которую обозначим  $q_{BO}(t)$ . Введем в схему некоторое число  $n$  восстанавливающих органов, так чтобы на каждый ВО приходилось  $3s$  элементов, т.е.  $n \cdot s = l$  (рис. 3.7).

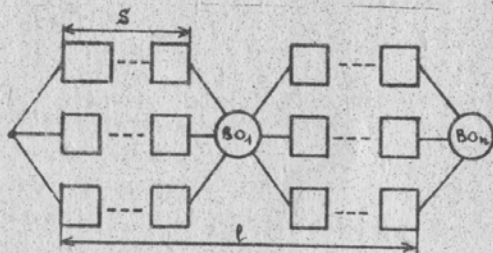


Рис. 3.7

Вероятность отказа системы из условия, что отказ наступает при втором отказе в одной из  $l$  частей резервного соединения, определяется выражением

$$q_{PC(2,3)}(t) = n [q_{BO}(t) + \{1 - q_{BO}(t)\} \{3q_{BO}^2(t)s^2 - 2q_{BO}^3(t)s^3\}], \quad (3.12)$$

которое с учетом малости  $q_{BO}(t)$  допустимо упростить:

$$q_{PC(2,3)}(t) \approx n q_{BO}(t) + \frac{3q_{BO}^2(t)l^2}{n}. \quad (3.13)$$

Величину  $n$  будем считать аргументом функции  $q_{PC}(t)$ . Тогда значение  $n$ , при котором вероятность отказа системы будет минимальной, находится из условия  $\frac{\partial q_{PC}(t)}{\partial n} = 0$ :

$$n = \sqrt{3q_{BO}(t)} \cdot l \quad \text{или} \quad n = \frac{\sqrt{3} \cdot q_{BO}(t)}{\sqrt{q_{BO}(t)}}. \quad (3.14)$$

Таким образом, в триплексной системе, каждый канал которой характеризуется вероятностью отказа  $q_{BO}(t)$ , оптимальное количество одинаковых в смысле надежности восстанавливающих органов с вероятностью отказа одного ВО  $q_{BO}(t)$  (рис. 3.8) будет равно  $n$ , округленному до целого числа в большую сторону.

Выбор оптимальной структуры ВО или определение характера логических преобразований совокупности выходных величин резервного соединения составляет одну из важных задач обеспечения требуемых характеристик надежности бортовых систем.

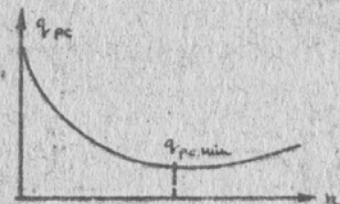


Рис. 3.8

### 3.3. Восстанавливающая функция и схемы ВО

Независимо от конкретной схемной и конструктивной реализации ВО к функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  может быть предъявлен ряд общих требований. В дальнейшем функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  будем называть восстанавливающей функцией.

Каждая из величин поступающих на вход ВО может быть представлена в виде истинной величины  $X$  и ошибки  $Y$ . Тогда  $x_i = x + y_i, i = 1 \dots n$ . При работе всех резервных объектов без погрешностей восстанавливающая функция должна быть равна истинной величине  $X$ , т.е.  $f(x_1, \dots, x_n) = X$  при  $x_i = x$ . Погрешностью восстанавливающей функции будем называть величину  $y_{BO}$ . Эта погрешность при отказе одного или более объектов

не должна превышать предельной  $\varepsilon_{отк}$ , т.е.

$\varepsilon_{отк} \geq |Z_{в0}|$ , где  $Z_{в} = f(x_1, \dots, x_n) - X$  при  $k = n$   
( $k$  - число отказавших объектов).

Рассмотрим устройство, имеющее  $n$  входов, обозначаемых  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , и один выход, обозначаемый через  $y$ . Функция  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  называется булевой, если она принимает значения 0 и 1 и ее аргументы также принимают значения 0 и 1.

Для описания дискретных устройств применяются также функции, у которых аргументы и сами функции принимают более двух значений. Функция, принимающая значения из множества  $\{0, 1, \dots, k-1\}$ , аргументы которой также принимают значение из этого же множества, называется функцией  $k$ -значной логики.

При аналоговой форме представления физическая величина, изображающая математическую переменную, может изменяться непрерывно и связана с последней постоянным масштабным коэффициентом. Поэтому в данном случае необходимо применение аналоговой, или непрерывной, логики. Переход от дискретной  $k$ -значной логики к непрерывной логике можно представить как предельный переход.

Для непрерывной и дискретной логики справедливы: свойства ассоциативности, коммутативности, дистрибутивности, законы де Моргана и закон двойного отрицания.

Непрерывная логика позволяет обобщить представления логических операций в дискретной логике через алгебраические операции в обычном смысле. При этом привлекаются операции выявления модуля величины.

Дизъюнкция и конъюнкция в общем виде могут быть выражены следующим образом:

$$X_1 \vee X_2 = \max(X_1, X_2) = \frac{1}{2}(X_1 + X_2 + |X_1 - X_2|), \quad (3.15)$$

$$X_1 \wedge X_2 = \min(X_1, X_2) = \frac{1}{2}(X_1 + X_2 - |X_1 - X_2|). \quad (3.16)$$

Если логическая операция совершается над  $n$  переменными, то алгебраическая формула для такой многократной операции может быть получена на основе попарного выбора переменных. Например, при четном

$$\max(X_1, \dots, X_n) = \max(\max(X_1, X_2), \dots, \max(X_{n-1}, X_n)) =$$

$$= \frac{1}{2} \max(X_1 + X_2 + |X_1 - X_2|, \dots, X_{n-1} + X_n + |X_{n-1} - X_n|). \quad (3.17)$$

Если продолжать операцию попарного выбора, то можно получить формулу в модулях, сложность которой будет резко возрастать при увеличении числа переменных  $n$ .

Логическая функция непрерывных переменных сама является непрерывной величиной. Поэтому логические операции сочетаются с операциями обычной алгебры. На этом основании в последнем выражении общий множитель  $\frac{1}{2}$  вынесен за знак  $\max$ .

В непрерывной логике отрицание сводится к перемене знака величины  $\bar{X} = -X$ , что соответствует случаю, когда центр множества значений логической функции и ее аргументов совпадает с нулем.

Справедливы также соотношения:

$$X_1 + \max(X_2, X_3) = \max(X_1 + X_2, X_1 + X_3), \quad (3.18)$$

$$X_1 - \min(X_2, X_3) = \min(X_1 + X_2, X_1 - X_3), \quad (3.19)$$

$$\max(X_1, X_2) + \max(X_3, X_4) = \max(X_1 + X_3, X_1 + X_4, X_2 + X_3, X_2 + X_4), \quad (3.20)$$

$$\max(X_1, X_2) - \min(X_3, X_4) = \max(X_1 - X_3, X_1 - X_4, X_2 - X_3, X_2 - X_4). \quad (3.21)$$

Справедливость этих соотношений сохраняется при замене в каждом из этих выражений знаков  $\max$  на  $\min$  и  $\min$  на  $\max$ .

Жесткие требования предъявляются к восстанавливающей функции по динамике. Они сводятся к тому, чтобы при исправной работе всех подканалов выходная величина соответствовала совокупности входных величин без дополнительных шумовых помех и динамических искажений (например, запаздывания). Самым ответственным требованием к восстанавливающей функции является требование сохранения значения выходной величины при отказе типа "ложный сигнал" одного или большего количества объектов, при котором входной сигнал системы принимает свое предельное значение (положительное или отрицательное). Это требование и явилось основной причиной выделения ВО в самостоятельную часть резервированных систем.

Для дискретных устройств в качестве восстанавливающей применяется мажоритарная функция.

Мажоритарная функция выполняет операцию "голосования"

$$f(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} x_1, & \text{если } x_1 = x_2, x_1 = x_3, x_1 = x_2 = x_3; \\ x_2, & \text{если } x_2 = x_3. \end{cases} \quad (3.22)$$

В непрерывных системах принцип голосования непосредственно в виде (3.22), (3.23) применен быть не может, так как даже при исправной работе всех ветвей резервного соединения из-за разбросов на допуск нельзя отдать предпочтения какому-либо одному сигналу. Для осреднения допускового разброса может быть использована восстанавливающая функция, обеспечивающая получение средне-арифметической величины. При этом восстанавливающая функция с учетом возможных отказов должна быть построена по принципу исключения предельных значений, т.е.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \max(x_1, \dots, x_n) - \min(x_1, \dots, x_n)}{n-2} \quad (3.24)$$

Простейшим элементом, выполняющим элементарную операцию непрерывной логики, является диод. При прямой проводимости зависимость тока от напряжения р-п перехода экспоненциальна и диод можно аппроксимировать при синтезе схем короткозамкнутой цепи в открытом состоянии и разомкнутой цепи в закрытом состоянии. Ток в цепи, состоящей из последовательно соединенных диода и активного сопротивления  $R$ , не может быть больше или меньше нуля, т.е.

$$i = \frac{1}{R} \max(0, U) \quad \text{или} \quad i = \frac{1}{R} \min(0, U),$$

где  $U$  - напряжение постоянного тока, пропорциональное значению переменной.

Реализация восстанавливающей функции диодной схемой представлена на рис. 3.9.

Схема содержит суммирующее устройство на резисторах и логическую часть выделения максимального и минимального сигналов. Существует возможность значительно повысить надежность схемы путем исключения источника постоянного напряжения, обеспечивающего работу схем  $\max$  и  $\min$  при положительной и отрицательной полярности сигнала. Если вычесть из первого входного напряжения максимальное напряжение из всех остальных входных сигналов при отключенном блоке питания, то разность будет равна

$$\min(U_1 - \max(U_2, U_3, \dots, U_n), 0)$$

Представим  $0 = U_1 - U_1$  и на основании тождественных соотношений имеем

$$\min(U_1 - \max(U_2, U_3, \dots, U_n), U_1)$$

(В последнем преобразовании использовано свойство ассоциативности логических формул.)

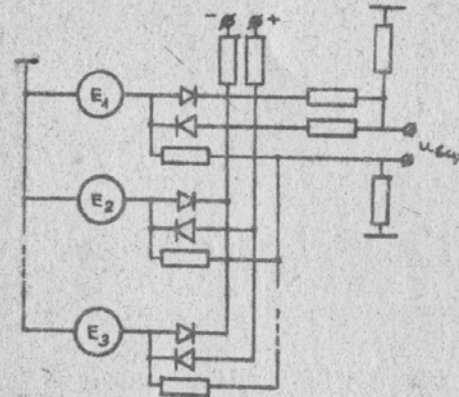


Рис. 3.9

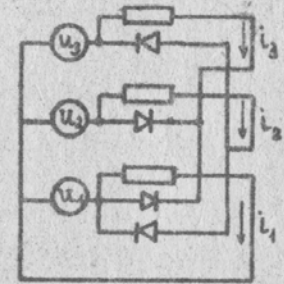


Рис. 3.10

Схема ВО для трех каналов, реализующая эту логическую форму, представлена на рис. 3.10.

Выходную величину восстанавливающего органа удобнее представить в виде трех токов, которые можно просуммировать на входе следующего участка резервного соединения. Работу устройства иллюстрирует табл. 3.2.

Таблица 3.2

Сочетание входных напряжений	Ток в масштабе $R^{-1}$			
	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$\sum i_j$
$U_1 > U_2 > U_3$	$U_1$	$U_2 - U_3$	$U_3 - U_1$	$U_2$
$U_2 > U_1 > U_3$	$U_1$	$U_2 - U_3$	0	$U_2$
$U_3 > U_1 > U_2$	$U_1$	$U_2 - U_3$	$U_3 - U_2$	$U_1$
$U_2 > U_3 > U_1$	$U_1$	0	0	$U_1$
$U_1 > U_3 > U_2$	$U_1$	0	$U_3 - U_2$	$U_3$
$U_2 > U_3 > U_1$	$U_1$	$U_2 - U_1$	$U_3 - U_2$	$U_3$

При схемной реализации восстанавливающей функции целесообразно использовать эквивалентные преобразования логических соотношений. Каждой форме логической восстанавливающей функции может соответствовать и своя схема ВО. Например, соотношение

$$X_1 + X_2 + X_3 - \max(X_1, X_2, X_3) - \min(X_1, X_2, X_3)$$

может быть преобразовано в общую логическую цепь без операции суммирования. Представим первые четыре слагаемых, в соответствии с приведенным тождественным соотношением, в виде

$$\min(X_2 + X_3, X_1 + X_3, X_1 + X_2)$$

и обозначим его  $X_4$ .

Повторно применим то же соотношение и получим значение функции в виде

$$\max(X_4 - X_1, X_4 - X_2, X_4 - X_3) =$$

$$= \max(\min(X_2 + X_3 - X_1, X_2, X_3), \min(X_2, X_1 + X_3 - X_2, X_1), \min(X_2, X_1, X_1 + X_2 - X_3)) \quad (3.25)$$

Анализ этого выражения показывает, что члены, составленные из алгебраической суммы переменных, не могут быть значением логической функции. Действительно, предположим, что первый минимум выделил  $X_2 + X_3 - X_1$ , что возможно при условии  $X_2 + X_3 - X_1 < X_2$ , т.е.  $X_3 < X_1$ , и  $X_2 + X_3 - X_1 < X_3$  или  $X_2 < X_1$ . При этом результатом двух других минимумов не могут быть члены, составленные из алгебраической суммы и общим результатом будут  $X_1$  или  $X_2$ . Подобным образом могут быть проверены другие сочетания переменных, и на этом основании восстанавливающая функция (3.25) упрощается до вида

$$\max(\min(X_1, X_2), \min(X_2, X_3), \min(X_1, X_3)) \quad (3.26)$$

Используя свойство дистрибутивности, имеем также форму

$$\min(\max(X_1, X_2), \max(X_2, X_3), \max(X_1, X_3))$$

$$X_1 + X_2 + X_3 - \max(X_1, X_2, X_3) - \min(X_1, X_2, X_3) = \\ = \max(\min(X_1, X_2), \min(X_2, X_3), \min(X_1, X_3))$$

Схема восстанавливающего органа и отдельно его составляющие, соответствующие форме единого максимума (3.26), представлена на рис. 3.II. Кроме этого, существует реализация восстанавливающей функции на диодных мостах, осуществляющих функцию ограничения тока. Схема ВО, названная кворум-элементом, приведена на рис. 3.I2 [ I ].

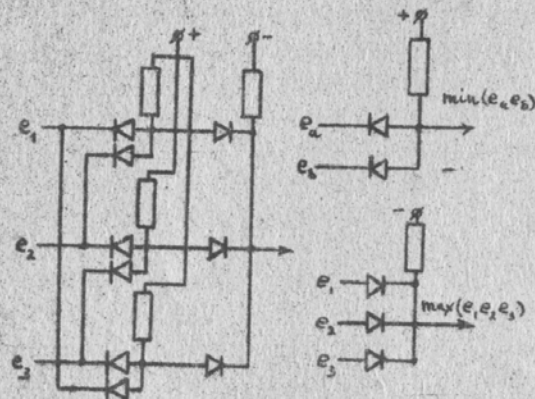


Рис. 3.II

Рассмотренные ВО обеспечивают работоспособность резгвированных систем вне зависимости от значения и знака ложного сигнала, который появляется на выходе канала при отказе. Если известно, что отказы имеют только однозначное проявление, то появляется возможность применять более простые ВО. При этом достоверную выходную величину можно получить и при двух одинаковых устройствах. Например, у вто-

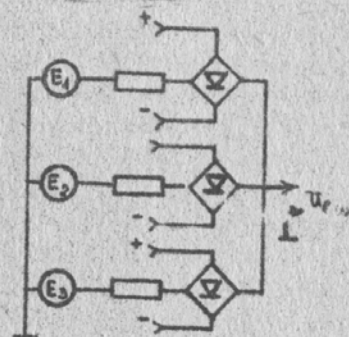


Рис. 3.I2

ричного источника питания постоянным током при всех возможных отказах его элементов и сочетаниях отказов элементов может происходить только уменьшение напряжения питания ниже технологического допуска. По аналогии с рассмотренным видом восстанавливающей функции мы должны из суммы напряжений источников питания вычесть меньшее:  $U_1 + U_2 + \min(U_1, U_2) = \max(U_2, U_1)$ ; распространяя это на  $n$  каналов, имеем  $\max(U_1, \dots, U_n)$ . Простейшая реализация этой восстанавливающей функции приведена на рис. 3.II в качестве составной части ВО.

### 3.4. Расчет надежности резервированного и восстанавливаемого объекта

**Понятие состояния объекта.** Пусть объект  $\mathcal{B}$  является резервируемым и восстанавливаемым, причем с течением времени отдельные узлы объекта отказывают и отказавшие узлы заменяются работоспособными узлами, т.е. работоспособность объекта восстанавливается. Следовательно, такой объект в зависимости от отказа того или иного узла и его восстановления характеризуется рядом конечных состояний  $S_0, S_1, \dots, S_n$ . Поэтому говорят, что в таком объекте протекает случайный процесс.

Случайный процесс, протекающий в объекте, называется марковским случайным процессом, если для любого момента времени  $t_0$  вероятностные характеристики процесса в последующие моменты времени (в будущем) зависят только от его состояния в данный момент времени  $t_0$  и не зависят от того, как и когда объект "пришел" в это состояние, т.е. всю предысторию объекта можно забыть. Интерес представляет будущее объекта - поведение объекта в те моменты времени, для которых  $t > t_0$ . Принципиально переход объекта из одного возможного для него состояния в другое представляет собой случайный процесс, поэтому в каком точно состоянии будет находиться объект - не предсказуемо. Но вероятностные характеристики процесса в будущем могут быть определены. Например, может быть определена вероятность того, что через некоторый промежуток времени  $\Delta t$  объект окажется в состоянии  $S_i$  или сохранит состояние  $S_0$ . Итак, при расчете надежности резервированного объекта, как правило, имеют дело с марковским случайным процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем, причем "переход" объекта из состояния в другое состояние происходит мгновенно и в неопределенные случайные моменты времени.

Рассмотрим триплированный объект, состоящий из 3 идентичных нерезервируемых подьобъектов. Обозначим подьобъекты через 1, 2 и 3, причем примем, что для подьобъектов характерны только отказы типа "обрыв". Тогда объект работоспособен, если работоспособен хотя бы один из подьобъектов. Обозначим работоспособное состояние подьобъекта соответствующей ему цифрой, отказавшее состояние - чертой над той же цифрой. Следовательно, для такого объекта характерны 7 состояний:  $S_0 = \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}$ ;  $S_1 = \bar{1}, 2, 3$ ;  $S_2 = 1, \bar{2}, 3$ ;  $S_3 = 1, 2, \bar{3}$ ;  $S_4 = \bar{1}, \bar{2}, 3$ ;  $S_5 = \bar{1}, 2, \bar{3}$  и  $S_6 = \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}$ .

Очевидно, что состояние  $S_0$  соответствует случаю, когда все подьобъекты работоспособны, состояние  $S_7$  - отказавшему объекту. Обычно состояние объекта изображают в виде графа (рис. 3.13).

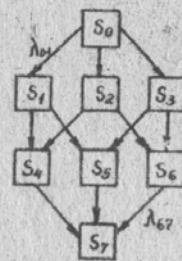


Рис. 3.13

**Поток событий.** Потоком событий называется последовательность однородных событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени. События, образующие поток, сами по себе вероятностными характеристиками не обладают. Поток событий оценивают интенсивностью потока  $\lambda(t)$ , т.е. средним числом событий, приходящих на единицу времени. Поток является стационарным, если его вероятностные характеристики не зависят от времени ( $\lambda = \text{const}$ ). Для стационарного потока события (их появление) не носят закономерного характера, т.е. на одни участки временной оси может приходиться больше событий, чем на другие, но среднее число событий, приходящихся на единицу времени, постоянно и от рассматриваемого момента времени не зависит. Поток является потоком без последствия, если для любых двух непересекающихся интервалов времени число событий, "попавших" на один из них, не зависит от того, сколько событий произошло на другом. Поток называется ординарным, если "попадание" двух событий на малый интервал времени пренебрежимо мало. Поток является простейшим, если он стационарен, однороден и не имеет последствия. Для такого потока справедлив принцип суперпозиции.

**Уравнения Колмогорова для вероятностей состояний.** Пусть триплированный объект является восстанавливаемым. Если поток событий, переводящий объект  $\mathcal{B}$  из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$  - простейший, то протекающие в нем процессы являются марковскими. Обозначим через  $\lambda_{ij}$  интенсивность этого перевода в результате отказа подьобъекта, а через  $\mu_{ij}$  - интенсивность перевода из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$  в результате восстановления подьобъекта (рис. 3.14). Назовем вероятностью  $i$ -го состояния объекта вероятностью  $P_i(t)$  того, что в момент времени  $t$  объект находится в состоянии  $S_i$ . Очевидно, что

$$\sum_0^7 P_i(t) = 1, \quad i = 0, 1, \dots, 7.$$

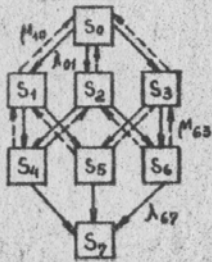


Рис. 3.14

Используя граф объекта, можно определить все  $p_i(t)$ . Рассмотрим, например, вероятность нахождения объекта в момент времени  $t$  в состоянии  $S_1$ . Дадим малое приращение времени  $\Delta t$ . Тогда нахождение объекта в состоянии  $S_1$  на интервале времени  $[t, t + \Delta t]$  возможно при следующих условиях:

объект находился в состоянии  $S_1$  и не "ушел" из этого состояния;

объект находился в состояниях  $S_0, S_4, S_5$

и за время  $\Delta t$  "перешел" в состояние  $S_1$ .

Вероятности выполнения этих условий следующие:

$$p_1(t) [1 - (\lambda_{14} + \lambda_{15} + \mu_{10}) \Delta t] \text{ и } [p_4(t) \mu_{41} + p_5(t) \mu_{51} + p_0(t) \lambda_{01}] \Delta t,$$

$$\text{и } p_1(t + \Delta t) = p_1(t) - [p_1(t) (\lambda_{14} + \lambda_{15}) + p_0(t) \lambda_{01} + \mu_{41} p_4(t) + \mu_{51} p_5(t)] \Delta t + \mu_{10} p_1(t) \Delta t.$$

Тогда, переходя к пределу, получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} = -p_1(t) [\lambda_{14} + \lambda_{15} + \mu_{10}] + p_0(t) \lambda_{01} + \mu_{41} p_4(t) + \mu_{51} p_5(t),$$

т.е.

$$\frac{d p_1(t)}{d t} = -(\lambda_{14} + \lambda_{15}) p_1(t) + \lambda_{01} p_0(t) + \mu_{41} p_4(t) + \mu_{51} p_5(t) - \mu_{10} p_1(t).$$

Рассматривая подобным образом вероятности для других состояний, будем иметь систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний объекта:

$$\frac{d p_0(t)}{d t} = \mu_{10} p_1(t) + \mu_{20} p_2(t) + \mu_{30} p_3(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03}) p_0(t);$$

$$\frac{d p_1(t)}{d t} = \mu_{41} p_4(t) + \mu_{51} p_5(t) + \lambda_{01} p_0(t) - (\lambda_{14} + \lambda_{15} + \mu_{10}) p_1(t);$$

$$\frac{d p_2(t)}{d t} = \mu_{42} p_4(t) + \mu_{62} p_6(t) + \lambda_{02} p_0(t) - (\lambda_{24} + \lambda_{26} + \mu_{20}) p_2(t);$$

$$\frac{d p_3(t)}{d t} = \mu_{53} p_5(t) + \mu_{63} p_6(t) + \lambda_{03} p_0(t) - (\lambda_{35} + \lambda_{36} + \mu_{30}) p_3(t);$$

$$\frac{d p_4(t)}{d t} = \mu_{47} p_4(t) + \lambda_{14} p_1(t) + \lambda_{24} p_2(t) - (\lambda_{47} + \mu_{41} + \mu_{42}) p_4(t);$$

$$\frac{d p_5(t)}{d t} = \mu_{75} p_7(t) + \lambda_{15} p_1(t) + \lambda_{35} p_3(t) - (\lambda_{57} + \mu_{51} + \mu_{53}) p_5(t);$$

$$\frac{d p_6(t)}{d t} = \mu_{76} p_7(t) + \lambda_{26} p_2(t) + \lambda_{36} p_3(t) - (\lambda_{67} + \mu_{62} + \mu_{63}) p_6(t);$$

$$\frac{d p_7(t)}{d t} = \mu_{47} p_4(t) + \lambda_{57} p_5(t) + \lambda_{67} p_6(t) - (\mu_{47} + \mu_{75} + \mu_{76}) p_7(t).$$

Начальными условиями для этой системы являются:  $t=0, p_0=1, p_1(0)=p_2(0)=p_3(0)=p_4(0)=p_5(0)=p_6(0)=p_7(0)=0$ .

Решая эту систему уравнений, например, с помощью преобразования Лапласа, определяем вероятности нахождения объекта в определенном состоянии в заданные моменты времени и вероятность работоспособности объекта на заданном интервале времени в целом.

#### 4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ\*

Гироскопические датчики первичной информации (ГДПИ) АСОНиС являются достаточно сложными электромеханическими приборами, и уровень их надежности ниже требований, предъявляемых к уровню надежности системы и ее элементов в целом. Эффективным способом преодоления этого недостатка ГДПИ является применение структурного резервирования, позволяющего повысить такие показатели эффективности, как точность и надежность. Правда, это увеличивает массу и габариты АСОНиС, поэтому кратность резервирования в АСОНиС не превышает трех, т.е.  $K \leq 3$ .

Надежность измерения параметров движения ЛА при структурном резервировании ГДПИ может быть увеличена принципиально двумя путями.

Первый путь заключается в резервировании самих ГДПИ в пределах одного измерительного базиса (рис. 4.1). Второй путь - в резервировании измерительных базисов.

Важным вопросом при структурном резервировании ГДПИ является вопрос идентификации отказавшего ГДПИ. Для этой цели в настоящее время широко используются восстанавливающие органы мажоритарного типа и типа выделения промежуточного сигнала из трех и более нечетных выходных сигналов ГДПИ.

\* Глава написана совместно с инж. А.Н.Тырковым.

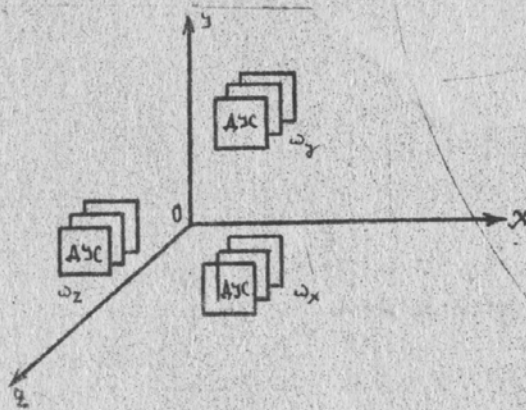


Рис. 4.1

Для любого типа ВО кратность резервирования должна быть не менее двух ( $K = 2$ ), в этом случае отказность системы  $\tau$  и кратность резервирования  $K$  связаны с общим количеством идентичных ГДПИ  $n$  следующим соотношением:

$$n = \tau(\tau + 1), \tau > 1, n = \tau(1 + K). \quad (4.1)$$

В целом резервирование ГДПИ в пределах одного измерительного базиса характеризуется табл. 4.1.

Таблица 4.1

$\tau$	$n$	Число идентифицируемых отказов по каждой оси
1	9	0
2	12	1
3	15	2
4	18	3

Минимальное число ГДПИ, образующих измерительный базис для измерения произвольно ориентированного в трехмерном пространстве вектора, равно трем. Увеличение числа измерительных базисов достигается применением  $n$  измерителей с неортогональным взаимным расположением и неортогональным расположением их осей чувствительности относительно осей основного базиса, за который принята связанная система координат  $LA OXYZ$ . При отсутствии коллинеарных и трех компланарных векторов, связанных с осями чувствительности, обеспечивается линейная независимость ориентации ГДПИ. Число измерительных базисов, образуемых  $n$  ГДПИ, составляет

$$N = C_n^3 = C_{m+3}^n, n = 3 + m, \quad (4.2)$$

где  $C_n^3$  и  $C_{m+3}^n$  - число сочетаний.

Вероятности отказов измерительной системы при различном количестве резервирующих ГДПИ исходной системы с тремя измерителями приведены в табл. 4.2, где вероятность отказа одного ГДПИ обозначена через  $q$ .

Таблица 4.2

Число ГДПИ	Вероятность отказа системы
3	$3q$
4	$q^4$
5	$5q^4 - 4q^5$
6	$15q^4 - 24q^5 + 10q^6$

Существенное повышение надежности измерительной системы при резервировании измерительных базисов достигается уже при введении одного резервного измерителя. Дальнейшее увеличение числа ГДПИ к существенному повышению надежности системы не приводит. Резервирование измерительных базисов с помощью четырех ГДПИ позволяет снизить требования к надежности самих ГДПИ.

При построении измерительной системы с резервированием измерительных базисов необходимо:

однозначно ориентировать каждый из ГДПИ относительно основного измерительного базиса (например, относительно связанной системы координат  $LA$ );

определить формулы преобразования координат измеряемого вектора в каждом избыточном измерительном базисе в координаты основного базиса.

Оптимизация ориентации ГДПИ относительно основного измерительного базиса приводит к их симметричной ориентации, например ориентации осей чувствительности ГДПИ перпендикулярно граням правильных многогранников (тетраэдра, октаэдра, додекаэдра и икосаэдра) или по образующим некоторого конуса (рис. 4.2).

Следует отметить, что при резервировании измерительных базисов отказ одного из ГДПИ может привести к "ликвидации" нескольких измерительных базисов. Общая зависимость количества ГДПИ от отказности измерительной системы определяется следующим выражением:

$$n = \tau + 4. \quad (4.3)$$

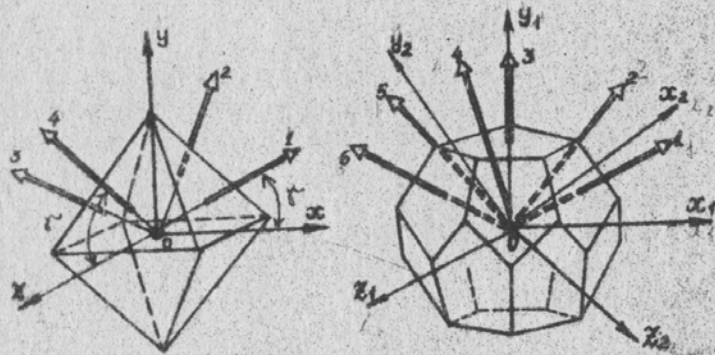


Рис. 4.2

Расчет по формуле (4.3) для различных вариантов построения измерительной системы приведен в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Количество ГДПИ	Число измерительных базисов	Число идентифиц. отказов
3	I	0
4	4	0
5	10	I
6	20	2

В качестве примера рассмотрим измерительную систему, состоящую из 4 ДУСов, оси чувствительности которых направлены по нормальным к граням тетраэдра (рис. 4.2). Проекции вектора угловой скорости ЛА на оси связанной системы координат определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 \omega_{x_1} &= \frac{\sin 45^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_2 - \frac{\cos 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_3 - 2 \cos 15^\circ \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{x_2} &= \frac{\sin 45^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_1 - \frac{\sin 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_3 + 2 \sin 15^\circ \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{x_3} &= \frac{\cos 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_1 + \frac{\sin 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_2 + \sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{x_4} &= \frac{2 \cos 15^\circ}{3 \cos \gamma} \omega_1 - \frac{2 \sin 15^\circ}{3 \cos \gamma} \omega_2 - \frac{\sqrt{2}}{3 \cos \gamma} \omega_3;
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\omega_{y_1} = \omega_1; \quad \omega_{y_2} = \omega_4; \quad \omega_{y_3} = \omega_4;$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{y_4} &= -\frac{1}{3} \operatorname{cosec} \gamma \cdot \omega_1 - \frac{1}{3} \operatorname{cosec} \gamma \cdot \omega_2 - \frac{1}{3} \operatorname{cosec} \gamma \cdot \omega_3; \\
 \omega_{z_1} &= \frac{\sin 45^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_2 - \frac{\sin 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_3 + 2 \sin 15^\circ \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{z_2} &= -\frac{\sin 45^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_1 - \frac{\cos 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_3 - 2 \cos 15^\circ \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{z_3} &= \frac{\sin 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_1 + \frac{\cos 15^\circ}{\cos \gamma \cdot \sin 60^\circ} \omega_2 + \sqrt{2} \operatorname{tg} \gamma \cdot \omega_4; \\
 \omega_{z_4} &= -\frac{2 \sin 15^\circ}{3 \cos \gamma} \omega_1 + \frac{2 \cos 15^\circ}{3 \cos \gamma} \omega_2 - \frac{\sqrt{2}}{3 \cos \gamma} \omega_3;
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

здесь  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  - проекции вектора угловой скорости ЛА, измеряемые ДУСами;

$\left. \begin{matrix} x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \\ x_3, y_3, z_3, x_4, y_4, z_4 \end{matrix} \right\}$  - измерительные базисы, образованные

соответственно ДУСами № 2-3-4, № 1-3-4, № 1-2-4 и № 1-2-3.

При таком построении измерительной системы имеются только два независимых значения угловой скорости рыскания ЛА, выдаваемых системой. При отказе какого-либо ДУСа одно из этих значений неверно, но какое именно - неизвестно. При возникновении отказа типа "ложный сигнал" у любого одного ДУСа три из четырех значений угловых скоростей  $\omega_x$  и  $\omega_y$ , выдаваемых системой, будут неверными, причем эти значения не равны между собой. Применение ВО мажоритарного типа или типа выделения промежуточного сигнала не приводит к желаемому результату. Не дает эффекта в данном случае и метод попарного сравнения значений идентичных проекций вектора угловой скорости ЛА.

Для идентификации отказавшего ДУСа необходимо введение еще одного дополнительного измерителя и построение новой измерительной системы. Так, в системе, состоящей из 5 ДУСов, оси чувствительности которых ориентированы по образующим конуса (рис. 4.3), применение метода попарного сравнения идентичных проекций вектора угловой

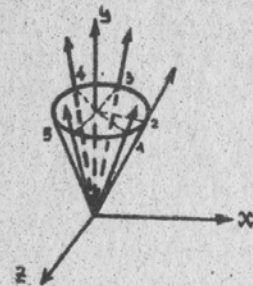


Рис. 4.3  
45



скорости ЛА позволяет выделить их правильное значение. Такое попарное сравнение 5 значений (из 10) проекций угловой скорости  $\omega_x$  приведено в табл. 4.4, в которой символ "I" соответствует неравным значениям сигналов, а символ "0" - равным значениям, т.е. измерительным базисам, выдающим верный результат. Как следует из табл. 4.4, даже при использовании только части информации, которую дает измерительная система с 5 ДУСами, можно однозначно определить отказавший ДУС, а следовательно, и измерительный базис, выдающий неверный результат.

Таблица 4.4

№ сравниваемых базисов	№ отказавшего ДУСа				
	1	2	3	4	5
2-3-4, 3-4-5	0	I	I	I	I
3-4-5, 4-5-1	I	0	I	I	I
4-5-1, 5-1-2	I	I	0	I	I
5-1-1, 1-2-3	I	I	I	0	I
1-2-3, 2-3-4	I	I	I	I	0

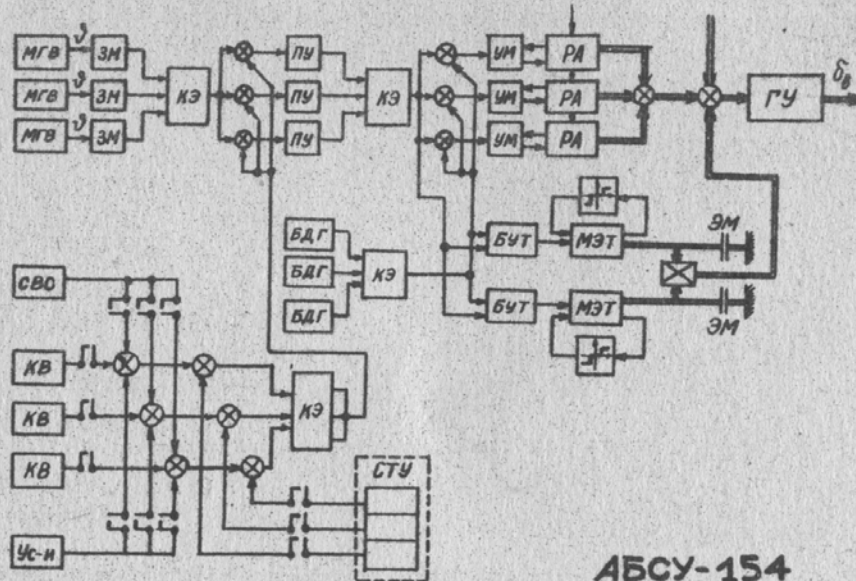
В заключение отметим, что при резервировании измерительных базисов надежность измерительной системы в целом определяется не только надежностью ДУСов, но и надежностью вычислительного устройства системы, осуществляющего пересчет выходных сигналов ДУСов в составляющую угловой скорости ЛА по осям связанной системы координат.

## 5. ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ АСОНС

### 5.1. Автомат стабилизации угла тангажа автоматической бортовой системы управления АБСУ-154

Система АБСУ-154 является частью пилотажно-навигационного комплекса и решает задачи автоматического управления ЛА. Каждый канал стабилизации АБСУ-154 построен по принципу смешанного резервирования. Полная структурная схема резервированного автомата стабилизации угла тангажа изображена на рис. 5.1 [1]. В соответствии с этой схемой сигналы, пропорциональные углу тангажа, поступают с трех малогабаритных гировертикалей (МГВ) на соответствующий кворум-элемент через три задающих механизма (ЗМ) и сигнализаторы напряжения, контролирующие работоспособ-

ность МГВ. После сопоставления в кворум-элементах (КЭ) сигналы тангажа по трем отдельным цепям поступают на три предварительных усилителя (ПУ), за которыми снова контролируются в КЭ и только затем по трем независимым цепям подаются на сервопривод. Каждый канал сервопривода состоит из трех одинаковых, параллельно действующих и не зависящих друг от друга подканалов. Все подканалы - усилитель мощности УМ и рулевой агрегат РА - связаны с разными бортовыми системами. Штоки РА каждого подканала через рычажную систему соединены с общим выходным звеном, дифференциально подключенным к проводке управления ЛА. По своему положению штоки РА могут иметь рассогласование, но если это рассогласование превысит некоторое допустимое, то неисправный агрегат будет автоматически отключен. После отключения неисправного подканала сервопривод сохраняет свои характеристики. Если произойдет второй отказ в данном канале, что маловероятно в течение одного полета, сервопривод автоматически отключится.



АБСУ-154

Рис. 5.1

Система автоматического триммирования (САТ) дублирована. В автоматическом режиме работы АБСУ-154 работает только один канал САТ - блок управления триммированием и механизм эффекта триммирования (БУТ-МЭТ). Второй канал САТ находится в состоянии "нагруженного" резерва (электромагнитная муфта ЭМ этого канала выключена). Контроль работоспособности подканалов САТ осуществляется с помощью порогового устройства.

Кроме гировертикалей, в АБСУ-154 триплексируются датчики угловых скоростей в блоке демпфирующих гироскопов (БДГ), корректоры высоты (КВ), задающие механизмы (ЗМ), причем схемы прохождения сигналов с БДГ и КВ аналогичны схемам прохождения сигналов тангажа.

### 5.2. Система директорного управления "Привод"

Система директорного управления "Привод" работает совместно с радионавигационными системами ближней навигации и бортовыми навигационными устройствами. Резервированная директорная система состоит из вычислителя и командного (директорного) прибора. Вычислитель системы на основании сигналов датчиков первичной информации формирует вторичную информацию в соответствии с реализованным в нем законом управления и выдает ее на командный прибор [4].

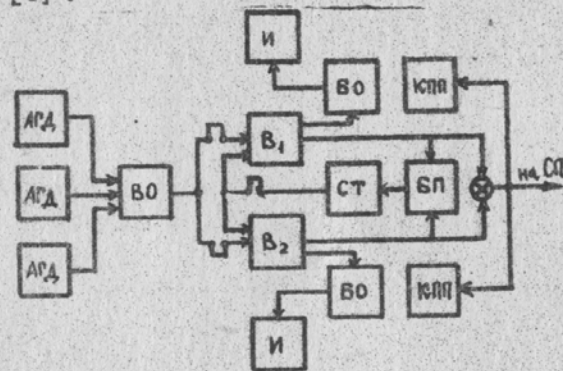


Рис. 5.2

В режиме ближней навигации допустимы кратковременные перемены процесса управления, поэтому один из вариантов системы "Привод" построен следующим образом. Рассмотрим продольный канал системы. Сигналы угла тангажа с трех гировертикалей АГД-1 поступают на восстанавливающий орган типа выделения промежуточного сигнала (см. рис. 5.2). Выход ВО связан с входами двух

вычислителей системы "Привод" ( $V_1, V_2$ ). Оба вычислителя работают одновременно, но независимо один от другого на командно-приборные приборы (КПП) и сервопривод автопилота (СПАП), т.е. осуществлено постоянное резервирование вычислителей и КПП. Выходные и промежуточные сигналы сравниваются в контролирующем устройстве блока переключения (БП), который при опасном отказе какого-либо вычислителя переводит оба вычислителя из рабочего режима в кратковременный режим тестконтроля. В режиме тестконтроля специальный генератор системы тестконтроля (СТ) подает тестсигналы в каждую цепь прохождения управляющих (командных) сигналов  $V_1$  и  $V_2$ , причем при исправном состоянии цепей  $V$  суммарный выходной тестсигнал на соответствующем блоке отключения (БО) имеет заданный калиброванный уровень. Любая неисправность в цепях прохождения тестсигналов приводит к автоматическому отключению отказавшего с одновременной сигнализацией о случившемся на индикаторе (И). Исправный  $V$  выключается в рабочий режим (т.е. включается в контур управления ДА) и продолжает нормально функционировать. Система тестконтроля одновременно является и системой контроля готовности вычислителей к работе.

Такое построение резервированного вычислителя обеспечивает его отказность, равную общему числу вычислителей, в то время как системы с восстанавливающими органами других типов, например вышеописанный автомат стабилизации угла тангажа, обладают отказностью, равной кратности резервирования, т.е. на единицу меньше общего числа подканалов системы.

### Л и т е р а т у р а

1. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Авиационные приборы и автоматы. - М.: Машиностроение, 1978. - 432 с.
2. Епифанов А.Д. Надежность систем управления. - М.: Машиностроение, 1975. - 180 с.
3. Системы автоматического и директорного управления самолетом / Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Киселев Ю.Ф. и др. - М.: Машиностроение, 1974. - 232 с.
4. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чиклаев М.С. Системы автоматической посадки. - М.: Машиностроение, 1975. - 216 с.
5. Окоемов Б.Н. Надежность схем и конструкций гироскопических систем. - М.: МВТУ, 1980. - 38 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Расчет надежности нерезервированных невосстанавливаемых объектов .....	4
1.1. Отказы системы .....	6
1.2. Приближенный расчет надежности .....	9
1.3. Уточненный расчет надежности .....	15
2. Основные методы повышения надежности гироскопических АСОНиС .....	17
3. Структурное резервирование объектов .....	22
3.1. Основные понятия .....	22
3.2. Восстанавливающие органы в АСОНиС .....	28
3.3. Восстанавливающая функция и схемы ВО .....	31
3.4. Расчет надежности резервированного и восстанавливаемого объекта .....	38
4. Резервирование гироскопических датчиков первичной информации .....	41
5. Примеры построения резервированных АСОНиС .....	46
5.1. Автомат стабилизации угла тангажа автоматической бортовой системы управления АБСУ-154 .....	46
5.2. Система директорного управления "Привод" .....	48
Литература .....	49