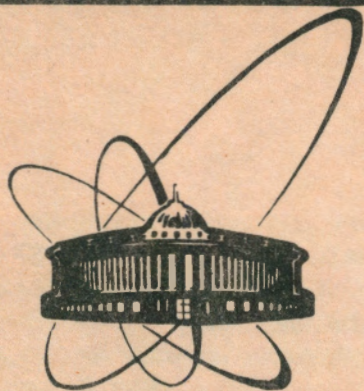


91-344



сообщения
Объединенного
Института
Ядерных
Исследований
Дубна

P11-91-344

Р.Малик

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ
КАНАЛОВ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ СУЗ ИБР-2

1991

Аппаратурные комплексы, связанные с аварийной защитой (АЗ) ядерных реакторов, должны отвечать особенно высоким требованиям. Структурно-электронная часть АЗ входит в состав системы управления и защиты (СУЗ). В СУЗ имеется четыре независимых, параллельно действующих канала аварийной защиты. Каждый канал составляется из одиннадцати функционально-специализированных модулей. Общая схема электроники одного канала АЗ и функциональные связи между модулями представлены на рисунке I. Схема на этом рисунке (сделана на основании документации СУЗ [1]) упрощена. Для большей ясности исключены элементы и функциональные связи, необходимые только во время тестирования СУЗ. С этой же целью не обозначены обратные связи цепи контура исправности и упрощенным способом указан задатчик мощности (в виде потенциометра, подключенного к импульсному усилителю - символ З-1).

Согласно техническому описанию СУЗ, обозначения на рисунке I означают:

- З-1 - импульсный усилитель,
- З-2 - импульсный вольтметр,
- З-3 - триггер "исправность",
- З-4 - триггер разрешающих импульсов,
- З-5 - триггер начала работы,
- З-6 - триггер уменьшения амплитуды импульсов,
- З-7 - триггер "предупреждение",
- З-8 - триггер "авария",
- З-9 - переключатель измерительного прибора М1731,
- З-10 - стабилизатор напряжений,
- З-11 - выпрямитель и источник питания.

Особым шрифтом обозначена функциональная связь между модулями З-3 и З-7 З-8, которая учитывается в документации, но не существует в составе каналов АЗ.

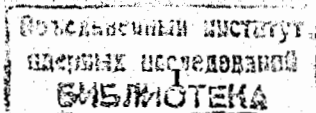
Определяя надежность электронной части АЗ, принимаем следующие, основные предположения:

- а) надежность электронных элементов - вероятность их безотказной работы в зависимости от времени (t) изменяется по закону показательного распределения [2]:

$$r(t) = \exp[-\Lambda t],$$

/I/

где частота отказов $\Lambda = \text{const}$.



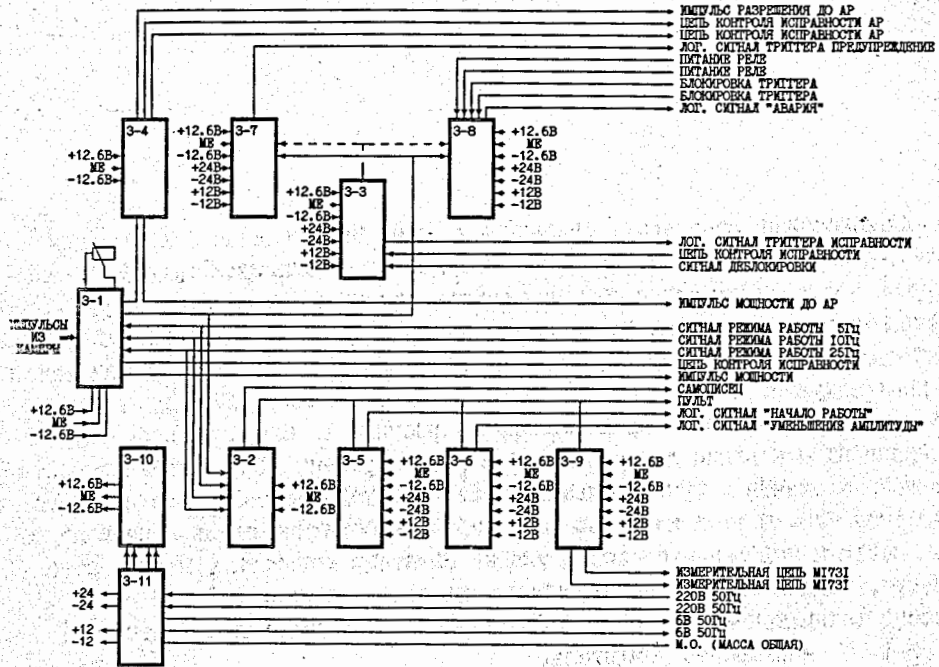


Рис.1. Общая схема электроники канала аварийной защиты СУЗ ИБР-2.

б) Частота отказов электронного устройства (модуля) является суммой частот отказов составных частей (элементов) этого устройства:

$$\Lambda = \sum \lambda_i \quad /2/$$

Обратить внимание нужно на важность условия б). Это условие строгое и означает, что в отказавшие модули включаются отказы и неисправности всех его элементов независимо от назначения.

Частота отказов элементов одного вида принимает различные величины в зависимости от его типа, класса и производителя. В более точных оценках дополнительно учитываются условия работы данного элемента, то есть температура окружающей среды и нагрузка элемента. Эти условия учитывают, вводя в формулу /1/ коэффициент к:

$$r(t) = \exp[-k\Lambda t] \quad /3/$$

Ниже указаны примерные величины коэффициента к для сопротивлений и конденсаторов. Приведенные в [7] значения соответствуют различным температурам и нагрузкам (относительно номинальной нагрузки).

Для сопротивлений:

темп. [°C]	относительная нагрузка				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.00
20	0.08	0.10	0.13	0.32	1.00
30	0.09	0.11	0.15	0.40	1.20
40	0.09	0.12	0.18	0.48	1.50

Для конденсаторов:

темп. [°C]	относительная нагрузка				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.00
20	0.03	0.09	0.23	0.54	1.00
30	0.04	0.09	0.24	0.54	1.00
40	0.05	0.10	0.25	0.56	1.10

В таблице I указан перечень значений λ для типов элементов, использованных в электронике АЗ. В последнем столбце этой таблицы приведены различные значения λ , учитывающие при этом, где это возможно: тип элемента, страну-изготовитель, условия работы и др. Эти значения использованы в приведенных далее вычислениях.

С использованием схем отдельных модулей и перечня их элементов [1] вычислены значения параметра λ (для определенного количества элемен-

ТАБЛИЦА I. ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ ИСТОЧНИКАМ

ТИП ЭЛЕМЕНТА	$\lambda \times 10^6$ [1/ч]					
	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	ПРИНЯТО
Сопротивления	0.004 + 0.89	0.1	0.14 + 0.40	0.0002	0.5	0.1
Сопротивления переменные	0.03 + 10.5	-	-	-	-	1.4
Конденсаторы	0.003 + 82	0.3	0.03 + 0.22	0.0009	0.5	2
Конденсаторы электролитические	0.09 + 7.35	-	-	-	0.001 + 0.05	0.2
Диоды	0.02 + 8	-	0.06 + 2.6	0.007 + 0.36	2.0	0.2
Транзисторы	0.04 + 3.2	-	0.45 + 0.83	-	2.0	1
Микросхемы	0.06 + 4.2	0.2	1.75	-	0.5	0.5
Трансформаторы	0.02 + 1.09	-	3.2	-	-	0.2
Тиристоры	4.3 + 12	-	-	-	-	12
Предохранители	0.5 + 4.64	-	-	-	-	0.5
Место пайки	0.002 + 0.08	0.005	-	-	-	0.01
Контакты	0.13 + 0.34	0.2	-	-	-	0.2

ТАБЛИЦА 2. КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕМЕНТОВ И ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ КАНАЛА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ТИП ЭЛЕМЕНТА	СИМВОЛ МОДУЛЯ																						
	3-1		3-2		3-3		3-4		3-5		3-6		3-7		3-8		3-9		3-10		3-11		
	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	n	λ	
Сопротивления	55	5.5	33	3.3	21	2.1	17	1.7	22	2.2	22	2.2	28	2.8	98	9.8	6	0.6	23	2.3	2	0.2	
Сопротивления переменные	3	4.6	3	2.8	-	-	1	1.4	3	1.4	3	1.4	4	1.6	3	4.2	-	-	2	2.8	-	-	
Конденсаторы	12	2.8	7	2.8	-	-	2	0.8	4	1.6	3	1.2	4	1.6	14	5.6	-	-	14	2.8	-	-	
Конденсаторы электролитические	14	2.8	5	1.6	4	0.8	6	0.6	2	0.6	3	0.6	3	0.6	9	1.8	-	-	43	8.6	-	-	
Диоды	11	2.2	8	1.6	8	1.6	6	0.6	9	1.8	6	0.6	14	2.8	20	20	-	-	14	2.8	12	2.4	
Транзисторы	3	3	-	-	7	1.6	6	0.6	3	0.6	5	1.5	4	1.5	3	3	-	-	6	6	-	-	
Микросхемы	3	3	-	-	1	0.5	1	0.5	2	1	1	1	3	1.5	2	2	-	-	1	1	-	-	
Трансформаторы	-	-	-	-	1	0.2	-	-	1	0.2	-	-	1	0.2	-	-	-	-	-	-	-	1	0.2
Тиристоры	-	-	-	-	1	12	-	-	-	-	-	-	1	12	-	-	-	-	-	-	-	-	
Предохранители	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	36	-	-	-	-	-	-	
Место пайки	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Контакты	267	2.7	173	1.7	124	1.2	92	0.9	122	1.2	126	1.3	151	1.5	490	4.9	78	0.8	155	1.6	110	1.1	
	20	4	10	2	15	3	14	2.8	10	2	10	2	11	2.2	24	4.8	96	19.2	12	2.4	18	3.6	
СУММА ПРИНЯТО	32.7	33	28.6	29	29.2	30	12.9	17.8	16.7	34.6	100.4	100.4	20.6	21	23.5	24	23.5	24	13.9	14			

тов) и параметра Δ для модулей. Результаты этих расчетов приведены в таблице 2. В последней строке таблицы помещены значения Δ , используемые в дальнейших расчетах.

Электронные модули, указанные на блок-схеме на рисунке 1, с функциональной точки зрения действуют как три составные части:

- информационная (И),
- автоматического регулирования (АР),
- аварийной защиты (АЗ).

Действуя как система информационная, электроника канала АЗ вырабатывает оптические и электрические сигналы об импульсах мощности реактора, а также об исправности самой аппаратуры. Для этой цели используются соответствующие электрические схемы с лампочками, встроенными в пять из указанных модулей. Импульсный вольтметр (3-2) и переключатель (3-9) позволяют измерять амплитуду импульсов мощности и все питающие напряжения. Электроника канала АЗ вырабатывает также электрические сигналы типа "Уменьшение амплитуды", "Начало работы" и другие, пересылаемые вне СУЗ. Информационную способность АЗ расширяет возможность непосредственного подключения самописца к вольтметру.

В режиме работы "автоматическое регулирование" электроника АЗ генерирует серию управляющих импульсов из модулей 3-1 и 3-4, пересылаемых в схему автоматического регулирования (АР).

Выполняя функцию аварийной защиты, электроника канала АЗ имеет задачу создания в определенных случаях сигнала "АВАРИЯ", поступающего дальше в схему Логики.

В реализации отдельных функций принимают участие (в различной степени) отдельные модули, что в общем виде показывает таблица 3.

ТАБЛИЦА 3. УЧАСТИЕ МОДУЛЕЙ КАНАЛА АЗ В РЕАЛИЗАЦИИ ОТДЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

ФУНКЦИЯ	СИМВОЛ МОДУЛЯ										
	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10	3-11
информации	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+
регулирования	+	0	0	+	0	0	0	0	0	+	+
защиты	+	0	0	0	0	0	0	+	0	+	+

+ - участвует, 0 - не участвует

Участие модуля в реализации функции с точки зрения надежности обозначает, что без данного модуля или в случае его отказа эта функция не может быть выполнена. По этой причине в таблице 3 учтены источники питания (модули 3-10 и 3-11).

Так как электроника канала АЗ выполняет различные функции, то, рассматривая вопрос надежности, нужно определить точно, о надежности какого действия идет речь.

Основным назначением канала АЗ является предупреждение опасных ситуаций, и тогда приведенное далее рассмотрение надежности будет касаться функции аварийной защиты.

На рис. 2 изображена схема электроники канала АЗ и ее функциональные связи при выполнении функции защиты согласно данным табл.3 и рис.1.

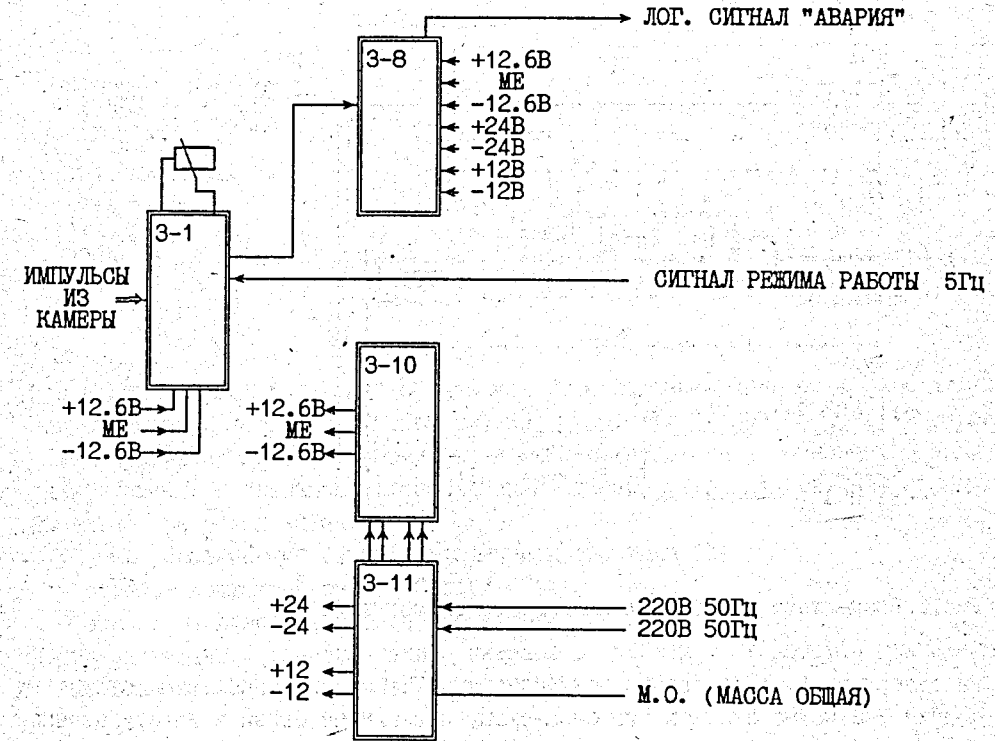


Рис.2. Общая схема электроники канала АЗ в функции защиты.

Для определения надежности необходимо учитывать общепринятые условия работы и эксплуатации СУЗ, а также классифицировать неисправности. Согласно этим требованиям принято, что:

- каналы АЗ работают в надежной структуре типа 2 из 4 или 1 из 3,
- работа происходит в определенных условиях (постоянная номинальная мощность реактора и частота),
- продолжительность непрерывной эксплуатации СУЗ достигает 300 часов,
- система АЗ является системой ремонтпригодной с продолжительностью ремонта не выше двух часов.

Определение указанных выше условий не является достаточным, так как модуль 3-8 многофункциональный.

Согласно техническому описанию модуль этот формирует логический сигнал "АВАРИЯ" в случаях, если:

- амплитуда импульса мощности превышает установленный порог,
- амплитуда импульса мощности меньше установленного порогового уровня,
- во время работы реактора на частотах 5, 10 (или 25) Гц появляются импульсы, имеющие частоту свыше 25 Гц.

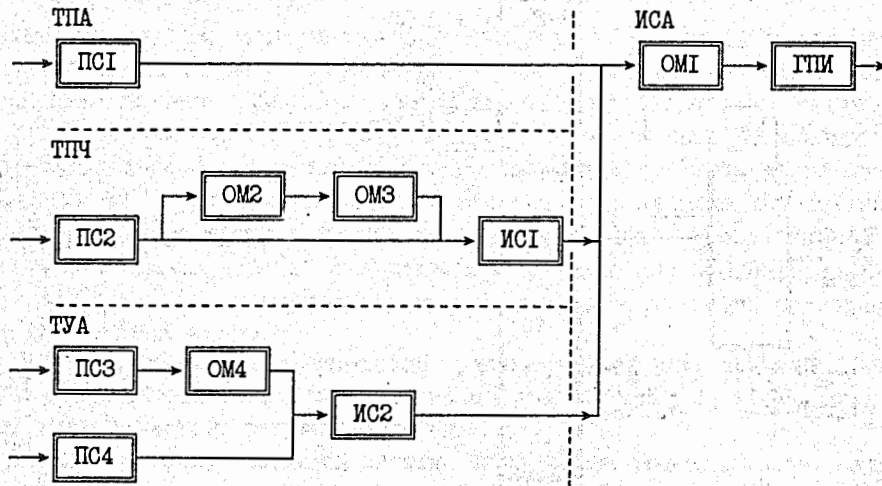


Рис.3. Блок-схема функциональных элементов модули 3-8.

Рассматривая (на основании документации СУЗ) функциональную структуру модуля 3-8, можно сделать его блок-схему и взаимные связи в виде, указанном на рисунке 3. Согласно этой схеме блок триггеров 3-8 состоит из следующих устройств:

- ИСА - источника сигналов "Авария", содержащего одностабильный мультивибратор (ОМ1) и генератор прямоугольных импульсов (ГПИ). ИСА является элементом, общим для всех триггеров.
- ТПА - триггера превышения амплитуды импульса мощности, или пороговой системы (ПС1).
- ТПЧ - триггера превышения частоты, составленного из пороговой системы (ПС2), двух одностабильных мультивибраторов (ОМ2 и ОМ3) и одной исполнительной системы (ИС1).
- ТУА - триггера уменьшения амплитуды импульса мощности, в котором различаются две пороговые системы (ПС3 и ПС4), одностабильный мультивибратор (ОМ4) и исполнительная система (ИС2).

Рассчитывая значение Λ для всех указанных выше функциональных элементов триггеров, мы не учитывали те участки, которые выполняют информационную роль. Это касается схем световой сигнализации. Результаты проведенных вычислений собраны в таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ДЛЯ СОСТАВА ТРИГГЕРОВ (МОДУЛИ 3-8)

ТИП ЭЛЕМЕНТА	ТПЧ		ИСА		ТПА		ПС2		ОМ2		ОМ3		ИС1		ПС3		ОМ4		ТУА		ИС2	
	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ	п	Λ
	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$	шт.	$\times 10^6$
Сопротивления	10	1	7	0.7	6	0.6	7	0.7	6	0.6	9	0.9	8	0.8	6	0.6	9	0.9	5	0.5	10	1
Сопротивления переменные	-	-	-	-	1	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.4	-	-	1	1.4	-	-
Конденсаторы	2	.8	1	.4	1	1.4	-	-	3	1.2	2	.8	1	.4	-	-	2	.8	1	1.4	-	-
Конденсаторы электролитические	1	.2	1	.2	1	1.4	-	-	4	1.2	2	.8	1	.4	-	-	2	.8	1	1.4	-	-
Диоды	7	1.4	4	0.8	2	0.4	2	0.4	4	0.8	5	1	3	0.6	2	0.4	3	0.6	3	0.6	2	0.4
Транзисторы	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Микросхемы	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5	-	-	1	0.5	1	0.5	1	0.5	1	0.5
Трансформаторы	1	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Итого пайки	58	0.6	32	0.3	30	0.3	24	0.2	34	0.3	41	0.4	38	0.4	26	0.3	43	0.4	24	0.2	49	0.5
Контакты	7	1.4	4	0.8	4	0.8	5	1	4	0.8	4	0.8	4	0.8	5	1	4	0.8	5	1	4	0.8
СУММА ПРИНЯТО	9	1	4	3.7	3	2.6	3	2.8	5	4.4	6	5.4	7	7.2	5	4.4	6	5.6	4	4.2	9	9.1

Последним этапом проведенного анализа была классификация отказов модулей или их частей. Отказом в нашем случае именуется такое событие, которое ведёт к полному или частичному прекращению исполнения основных функций данной схемы. В сделанной классификации отказов учтён их конечный эффект. Выделено три таких эффекта:

- отказ, вызывающий сигнал информационного типа (И),
- отказ, вызывающий сигнал "Авария" (А),
- отказ, не вызывающий видимого эффекта (-).

Итоги проведенной классификации указаны в таблице 5, в которой приведены также значения Λ для рассматриваемых схем.

ТАБЛИЦА 5. ИНТЕНСИВНОСТИ И ЭФФЕКТЫ ОТКАЗОВ МОДУЛЕЙ КАНАЛА АЗ.

Модуль	3-1	ИСА		ТПА	3-8				ТУА				3-10	3-11
		ГПИ	ОМ1		ПС2	ОМ2	ОМ3	ИС1	ПС3	ОМ4	ПС4	ИС2		
Эффект	И, А	А	-	-	-	-	-	-	А	А	-	-	И, А	И, А
$\Lambda \times 10^6$	33	9	4	3	3	5	6	7	5	6	4	9	24	14

Все отказы можно разделить на две основные группы: обнаруживаемые и опасные. Опасные отказы - это отказы, не вызывающие видимого эффекта, и оператор реактора не может узнать, что система защиты неисправна. Опасные отказы удаляются во время периодической проверки СУЗ, а отказы

обнаруживаемые - во время работы системы (если количество этих отказов не превышает одного).

Учитывая разделение модуля 3-8 по реализованным функциям (согласно блок-схеме на рис. 3), полученные результаты вычислений интенсивности отказов явных (Λ) и скрытых (λ), можно принять блок-схему канала АЗ, как на рисунке 4.

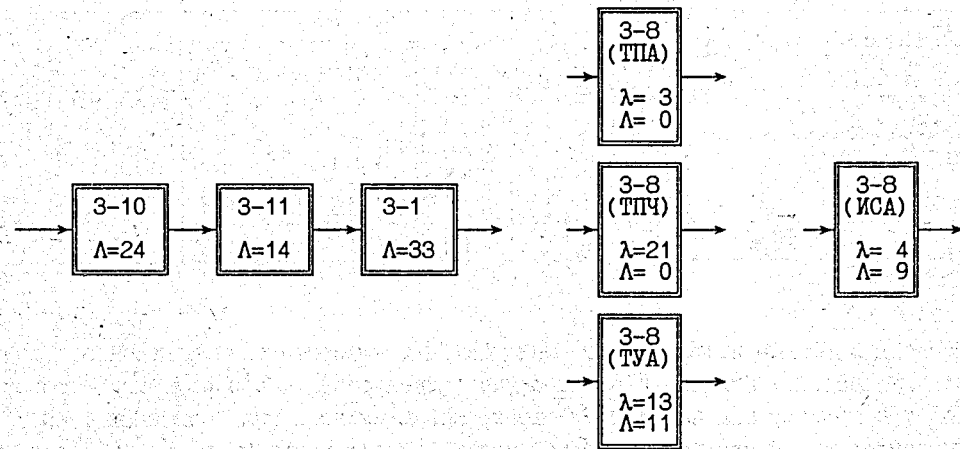


Рис. 4. Блок-схема надёжности и интенсивности отказов модулей канала АЗ.

Согласно принятому условию б) (суммирования интенсивности отказов) получаем в итоге для разных функций канала АЗ:

ТАБЛИЦА 6. ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ КАНАЛА АЗ

Функция	Λ	λ
превышение амплитуды импульса	$80 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
уменьшение амплитуды импульса	$118 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$
превышение частоты импульсов	$108 \cdot 10^{-6}$	$24 \cdot 10^{-6}$

Подводя итог проведенного анализа, можно систему АЗ описать следующим образом:

четыре независимых канала, действующих в структуре 2 из 4 (1 из 3) с отказами явными (которые можно убрать во время работы СУЗ в течение t_n часов) и отказами скрытыми (опасными).

Для таких систем можно построить граф возможных состояний, указаний на рисунке 5.

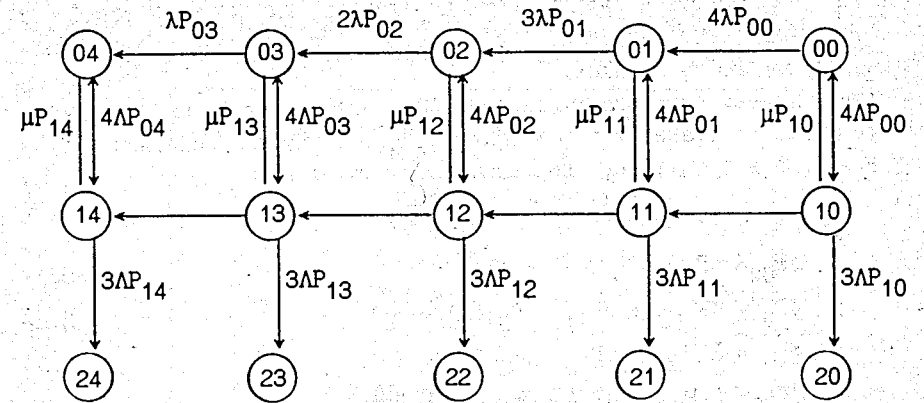


Рис. 5. Граф возможных состояний каналов АЗ.

В этом графе существует 15 состояний, обозначенных символами "xy", и 23 возможных перехода между этими состояниями.

Принятые символы:

- x - количество каналов, отказавших явно ($0 \leq x \leq 2$);
- y - количество каналов, имеющих скрытые отказы ($0 \leq y \leq 4$);
- Λ - интенсивность отказов явных;
- λ - интенсивность отказов скрытых;
- μ - интенсивность ремонтов ($\mu = 1/t_n$);

P_{xy} - вероятность пребывания системы в состоянии "xy" (зависящая от времени).

Произведения μP_{xy} , λP_{xy} и ΛP_{xy} на переходах между состояниями обозначают интенсивности этих переходов.

Описание скорости изменения вероятности пребывания системы в данном состоянии можно (например, для состояния "12") написать в виде

$$\frac{dP_{xy}}{dt} = 4\Lambda P_{02} + 3\lambda P_{11} - 2\lambda P_{11} - 3\lambda P_{12} - \mu P_{12} \quad /4/$$

Состояние "12" обозначает, что один канал отказал явным способом, а 2 канала - скрытым. Из этого состояния возможны переходы в:

- состояние "22", если явно отказал один из явно исправных до сих пор каналов ($3\lambda P_{12}$);
- состояние "13", если скрыто отказал один из каналов, в котором не было обнаруженных повреждений ($2\lambda P_{12}$);
- состояние "02", как эффект ремонта канала, явно поврежденного (μP_{12}).

В состоянии "12" система может быть вследствие перехода из состояния "11" ($3\lambda P_{11}$) или состояния "02" ($4\lambda P_{02}$), т.е. вследствие скрытого или явного отказа одного из каналов.

Полное описание всех состояний системы АЗ (согласно графу на рис.5)-это 15 дифференциальных уравнений, решаемых для начальных условий (для $t=0$) в которых $P_{00}=1$, а все остальные вероятности равны нулю:

$$\begin{aligned} dP_{00} &= \mu P_{10} - P_{00}(4\lambda + 4\lambda) & /5.1/ \\ dP_{01} &= 4\lambda P_{00} + \mu P_{11} - P_{01}(4\lambda + 3\lambda) & /5.2/ \\ dP_{02} &= 3\lambda P_{01} + \mu P_{12} - P_{02}(4\lambda + 2\lambda) & /5.3/ \\ dP_{03} &= 2\lambda P_{02} + \mu P_{13} - P_{03}(4\lambda + 2\lambda) & /5.4/ \\ dP_{04} &= \lambda P_{03} + \mu P_{14} - 4\lambda P_{04} & /5.5/ \\ dP_{10} &= 4\lambda P_{00} - P_{10}(4\lambda + \mu) & /5.6/ \\ dP_{11} &= 4\lambda P_{10} + 4\lambda P_{01} - P_{11}(3\lambda + 3\lambda + \mu) & /5.7/ \\ dP_{12} &= 3\lambda P_{11} + 4\lambda P_{02} - P_{12}(3\lambda + 2\lambda + \mu) & /5.8/ \\ dP_{13} &= 2\lambda P_{12} + 4\lambda P_{03} - P_{13}(3\lambda + \lambda + \mu) & /5.9/ \\ dP_{14} &= \lambda P_{13} + 4\lambda P_{04} - P_{14}(3\lambda + \mu) & /5.10/ \\ dP_{20} &= 3\lambda P_{10} & /5.11/ \\ dP_{21} &= 3\lambda P_{11} & /5.12/ \\ dP_{22} &= 3\lambda P_{12} & /5.13/ \\ dP_{23} &= 3\lambda P_{13} & /5.14/ \\ dP_{24} &= 3\lambda P_{14} & /5.15/ \end{aligned}$$

Вычисления, согласно этим соотношениям, проведены с учётом 300 часов непрерывной работы системы и 2 часов на время удаления явного отказа. Результаты этих вычислений приведены в таблице 7.

ТАБЛИЦА 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ И ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОНИКИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ СУЗ

состояние	превышение амплитуды	ФУНКЦИЯ уменьшение амплитуды	превышение частоты
P ₀₀	9.909×E-01	9.697×E-01	9.790×E-01
P ₁₀	6.339×E-04	6.203×E-04	7.123×E-04
P ₂₀	4.568×E-05	4.519×E-05	5.874×E-05
P ₀₁	8.361×E-03	2.930×E-02	2.009×E-02
P ₁₁	5.348×E-06	1.874×E-05	1.462×E-05
P ₂₁	1.930×E-07	6.807×E-07	6.022×E-07
P ₀₂	2.636×E-05	3.309×E-04	1.541×E-04
P ₁₂	1.686×E-08	2.117×E-07	1.121×E-07
P ₂₂	4.040×E-10	5.092×E-09	3.062×E-09
P ₀₃	3.683×E-08	1.655×E-06	5.235×E-07
P ₁₃	2.356×E-11	1.059×E-09	3.809×E-10
P ₂₃	4.216×E-13	1.900×E-11	7.767×E-12
P ₀₄	1.922×E-11	3.095×E-09	6.647×E-10
P ₁₄	1.230×E-14	1.980×E-12	4.837×E-13
P ₂₄	1.754×E-16	2.829×E-14	7.857×E-15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя действие системы, нужно учитывать, что самые опасные состояния - это состояния, в которых отказали скрыто 3 или 4 канала, т.е. система АЗ теоретически не действует. Это касается состояний 03, 04, 13 и 14. По этой причине, кроме вычислений вероятности пребывания системы в любом состоянии, вычислена сумма вероятности опасных состояний:

$$\Sigma P_o = P_{03} + P_{04} + P_{13} + P_{14} \quad /6/$$

Из указанных результатов следует, что для строгого критерия ΣP_o вероятность несрабатывания системы на требование определенной функции не должна превышать:

- для функции уменьшения амплитуды $1.659 \times E-06$,
- для функции превышения частоты $5.246 \times E-07$,
- для функции превышения амплитуды $3.687 \times E-08$.

Все эти результаты отвечают общим требованиям для систем управления и защиты ядерных реакторов ($P < 1E-05$), определенных по ГОСТу [8].

Опыт эксплуатации системы показал, что в период с декабря 1983 года до апреля 1991г в системе АЗ произошёл только один отказ: микросхемы в триггере превышения амплитуды. Событие это отвечает состоянию 01, для которого рассчитана вероятность порядка $8.4 \cdot 10^{-3}$.

Литература

1. Техническое описание комплекса аппаратуры ИБР-2. Instytut Badan Jadrowych, 1974.
2. Луцкий В.А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. << Наукова думка >>, 1966.
3. Prazewska M. 1 in. Niezawodnosc urzadzen elektronicznych. <<WLK>>, 1987.
4. Савелев А.Я., Овчинников В.А. Конструирование ЭВМ и системов. <<Высшая школа >>, 1989.
5. Informator o niezawodnosc i podzespolow elektronicznych (dane z lat 1984 - 1986). << COBRESPU >>, 1987.
6. Gladysz H., Peciakowski E. Niezawodnosc elementow elektronicznych. << WLK >>, 1984.
7. System Automatycznego Projektowania Niezawodnosc i Sprzetu Elektronicznego. PIT-Warszawa, 1988.
8. ГОСТ 26843-86 " Реакторы ядерные энергетические ". Общие требования и система управления и защиты.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1991 года.