

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
УДК 62-192:658.382.3

ЛЕОНОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ БЕЗОПАСНОСТИ  
НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Специальность 05.26.01 - Охрана труда

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Севастополь, 1996



00760086 (R)

Робота виконана на департаменті  
"Прикладна екологія і охорона праці"  
Севастопольського Государственного технічного університету

- Научний керівник - академик АНТК України,  
доктор техн. наук,  
професор Севриков В.В.
- Научний консультант - кандидат техн. наук,  
доцент Карпенко В.А.
- Офіційні опоненти - доктор техн. наук,  
професор Бохонський А.И.
- кандидат техн. наук,  
доцент Харченко А.О.
- Ведуче підприємство - ЦКБ "КОРАЛЛ"

Захист состоится "22" октября 1996 г. в 14 часов  
на засіданні Спеціалізованого Ради Д 11.03.04  
в Севастопольському Государственном технічному університеті  
по адресу: 335053, г.Севастополь, Стрелецька бухта,  
Студенський городок, корпус СевГТУ, ауд А-201.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью,  
направлять в адрес Ученого Совета.

Автореферат разослан "21" сентября 1996 г.

Учений секретарь Спеціалізованого Ради  
кандидат технічних наук,  
доцент

Гутник С.А.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Одной из главных задач современной прикладной науки является разработка и создание безопасных технологий, техники и производств в целом. Особое место в этом отводится применению высоконадежных технических средств безопасности, далее ТСБ, т.е. техническим системам обеспечивающим сохранение не только материальных ценностей, но здоровье и жизнь людей. К таким системам относятся, например, автоматические установки пожаротушения (АУП), системы аварийной защиты ядерных реакторов, устройства блокировки на металлорежущих станках, устройства аварийной остановки производственных линий, аварийного отключения электросетей и др.

В последнее время в мире, и особенно в нашей стране, наблюдается интенсивный рост числа несчастных случаев, включая их рост с летальным (смертельным) исходом. Поэтому, проблема обеспечения безопасности жизнедеятельности приобретает первоочередное государственное и международное значение. Создание и использование современных производств и техники без обеспечения их необходимой надежностью, не имеет смысла. Но, еще более опасно использование ненадежных ТСБ. Страшный урок в этом смысле преподнесла Чернобыльская трагедия. Очевидно, что требования к надежности ТСБ должны быть выше и жестче, чем аналогичные требования к другим техническим (производственным) системам.

К настоящему времени разработано и внедрено в производство огромное количество ТСБ. Тем не менее, в технической литературе имеется большой пробел по вопросам, примыкающим вплотную к проектированию: использования и испытания ТСБ, их устройств и характеристик эксплуатации. Более того, на сегодняшний день, отсутствует методика или хотя бы стройная концепция оценки надежности ТСБ, в том числе и на этапах проектирования. Оценка надежности ТСБ на этапах их разработки и проектирования в настоящее время затруднительна потому, что существующая теория надежности в чистом виде не учитывает особенности структур, режимов функционирования и условий эксплуатации этих технических систем. Тем не менее, принимая за базу современные методы теории надежности, возможно решить данную проблему.

Диссертационная работа является составной частью комплексных исследований, проводимых научной школой под руководством академика АНТХ Украины, д.т.н., профессора В.В.Севрикова в СевГТУ.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целью данной работы является:

- создание концепции оценки надежности ТСБ по ее составляющим на этапах их проектирования с учетом особенностей структур, функционирования и дальнейшего применения по назначению;
- разработка методов оценки надежности ТСБ при их проектировании, в частности для ранних этапов;
- разработка методик, которые позволят определять надежность ТСБ на каждом этапе его проектирования, и с учетом ее вести дальнейшую разработку и оптимизацию данной технической системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать научно обоснованную методику синтеза ТСБ и выбора рациональных вариантов их компоновки с учетом функциональных особенностей;
- теоретически обосновать составляющие результирующей надежности ТСБ, исследовать структурно-функциональную составляющую и разработать методы ее оценки на всех этапах проектирования;
- разработать научно-обоснованную методику определения структурно-функциональной составляющей результирующей надежности, как основного критерия при синтезе и оптимизации структур ТСБ;
- разработать методику оптимизации структурного резерва ТСБ при многих ограничениях;
- разработать необходимое алгоритмическое и программное обеспечение для определения уровня надежности ТСБ при их проектировании.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

На основании теоретических исследований:

- выдвинута концепция оценки уровня надежности ТСБ по ее составляющим с учетом режимов функционирования данных технических систем;
- разработаны методология и уточненные математические модели, определяющие структурно-функциональную составляющую результирующей надежности ТСБ;
- разработаны методики оценки рациональных вариантов структурной компоновки ТСБ и их оптимизации по критерию надежности на этапах проектирования;
- предложены элементы автоматизированного проектирования ТСБ.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

В результате проведения теоретических исследований получено необходимое методологическое, алгоритмическое и программное обеспечение, давшее возможность проектировать ТСБ с жестко заданным уровнем надежности на всех этапах разработки.

## АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях:

- "Современные проблемы пожаробезопасности и пожаротушения в замкнутых пространствах". Республиканская научно-техническая конференция, Севастополь, 1991;
- "Современные проблемы экологического приборостроения". Республиканская научно-техническая конференция, Севастополь, 1991;
- "Проблемы экологического мониторинга и охраны труда". Вторая Международная научно-техническая конференция, Севастополь, 1994;
- "Проблемы экологического мониторинга и охраны труда". Третья Международная научно-техническая конференция, Севастополь, 1995;
- "Проблемы охраны труда и технокологической безопасности". Четвертая Международная научно-техническая конференция, Севастополь, 1996.

## РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ

Результаты выполненных исследований внедрены: в ОГПО УВД Украины в г.Севастополе; Ассоциации "Безопасность жизнедеятельности" г.Севастополь; региональном центре "Крымэкология", г.Севастополь.

## ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ.

## СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Она содержит 183 страницы машинописного текста, 24 рисунка, 3 таблицы, библиографический список, включающий 101 наименование и 14 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении раскрыта актуальность проблемы, приведена краткая аннотация работы.

В первой главе дан краткий анализ состояния вопроса, связанного с проектированием и надежностью ТСБ. Анализ показал отсутствие методик и других материалов для руководства проектировщикам ТСБ, содержащих современные требования системного подхода и автоматизированного проектирования подобных систем. Исключением можно назвать ряд разрозненных нормативных документов по вопросам проектирования установок и средств противопожарной защиты, а также работы В.В. Севрикова и В.А. Карпенко.

Учитывая отсутствие методик и других руководящих документов для проектирования ТСБ, проведен анализ существующих аналогичных материалов по разработке смежного оборудования в машиностроении. Эти вопросы рассмотрены в работах Ныса Д.А., Сосонкина В.Л., Прохорова А.Ф., Пуша В.Э., Соломенцева Ю.М., Кузнецова В.Н. и других отечественных и зарубежных ученых. Анализ имеющихся работ показал, что существующие методики проектирования автоматического оборудования не совершенны и не могут быть перенесены в чистом виде для проектирования ТСБ, так как они не учитывают особенности структур, функционирования и надежности, как основного показателя технической эффективности этих устройств на всех этапах их проектирования. Однако, некоторые из методик частично могут быть взяты за основу при создании ТСБ.

В данной главе проведен также анализ существующих методик оценки надежности ТСБ на этапах проектирования и разработки, который выявил отсутствие каких-либо материалов и в этом вопросе. Исключением можно назвать работу Севрикова В.В., Карпенко В.А., Севрикова И.В. и работу Малашенина И.И., Перегуды А.И. Но узкие направленности этих работ, не позволяют полностью использовать предлагаемые методы для оценки надежности различных ТСБ. Учитывая отмеченное проведен анализ работ по методам оценки надежности станков, оборудования и автоматики в машиностроительном комплексе, а также других областях. Значительный интерес представляют работы Решетова Д.М., Рябинина И.А., Нечипоренко В.И., Дружинина Г.В., Червоного А.А. и других авторов.

Кроме этого, в данной главе проведен анализ существующих методик выбора номенклатуры задаваемых показателей надежности и нор-

мирования показателей надежности при проектировании.

Анализ показал, что рассмотренные методы оценки надежности оборудования и автоматики могут быть положены в основу разрабатываемой методики. Однако, не один из них в отдельности взятый не позволяет произвести оценку уровня надежности ТСБ.

В итоге первой главы сформулирована цель и определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методов формирования множества структур ТСБ, их синтезу, компоновке, оптимизации и выбору рациональных вариантов при проектировании.

Разработанный метод формирования множества структур ТСБ основан на морфологическом анализе технических систем и включает: декомпозицию ТСБ на модули (подсистемы), представление каждого модуля морфологической матрицей и построение графов возможных структур каждого модуля. Каждое ТСБ при декомпозиции целесообразно представлять четырьмя основными модулями (рис.1): модулем объекта контроля (ОК), модулем контроля (МК), модулем формирования (МФ) и модулем исполнения (МИ). Каждый модуль может быть описан морфологической матрицей вида ( для примера - модуль контроля):

$$\begin{matrix}
 \text{[МК]} = \begin{bmatrix}
 Y_{11} & Y_{21} & \dots & Y_{k1} \\
 Y_{12} & Y_{22} & \dots & Y_{k2} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \\
 Y_{1l1} & Y_{2l2} & \dots & Y_{klk}
 \end{bmatrix}, & (1)
 \end{matrix}$$

где  $Y_{kl}$  -совокупность параметров ( свойств )  $K$ -го узла  $L$ -го типа,  
 $L$  - число типов  $K$  - го узла,  
 $l$  - порядковый номер типа данного узла,  $l = 1,2,3,\dots,L$ .

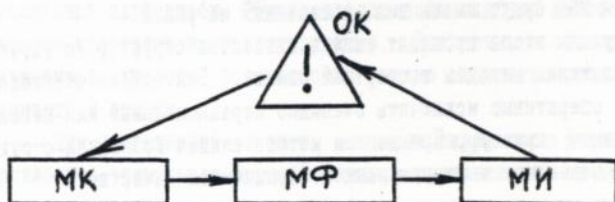


Рис.1 Декомпозиция ТСБ на модули.

Для большей наглядности и расшифровки параметров аналитические матрицы представляют в табличном виде (таблица 1).

Таблица 1  
Морфологическая матрица в табличном виде (фрагмент).

М о д у л ь   к о н т р о л я (МК)					
№ п	Субмодуль (узел, блок или признак)	Обоз- наче- ние	№ п	Характеристика, тип суб- модуля (узла, блока или признака)	Обоз- наче- ние
1	Датчик	Y1	1.1	Электромагнитный	Y11
			1.2	Тепловой максимального действия	Y12
			...	.....	.....
			1.25	Оптический взрывозащищенный	Y125
			...	.....	.....
2	Усилитель предвари- тельный	Y2	2.1	Операционный $K_y U > 8 \cdot 10^3$	Y21
			2.2	Низкой частоты на логических элементах	Y22
			...	.....	.....
7	Преобразова- тель	Y7	7.1	Аналого-цифровой четырехраз- рядный	Y71
			7.2	Электронно-механический	Y72
			...	.....	.....

Графы множества возможных структур для каждого модуля (для при-  
мера, модуля МК) будут иметь вид, показанный на рис.2.

На следующем этапе проводят синтез множества структур по укруп-  
ненным показателям методом экспертной оценки. Эта стадия необходи-  
ма, чтобы оперативно исключить очевидно нерациональные или невоз-  
можные варианты структур. При данном методе каждая возможная струк-  
тура модуля оценивается структурным коэффициентом качества  $K_c$

$$K_c = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - K_i) / n, \quad (2)$$

где  $K_i$  - значение показателя качества для  $i$  - го требования,  
причем  $K_i = 0 \dots 1$ .

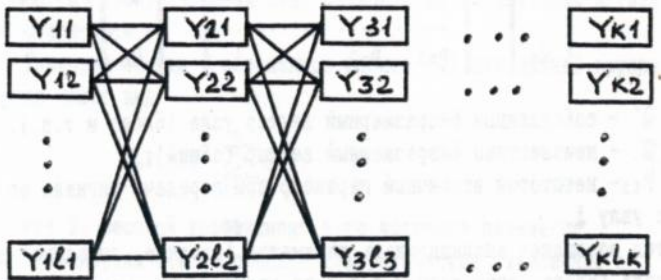


Рис.2. Граф множества возможных структур модуля МК.

Возможно, например, следующее задание  $K_i$ :  $K_i=1$  - возможный вариант структуры по  $i$ -му требованию;  $K_i=0$  - невозможный вариант структуры по  $i$ -му требованию. Или  $K_i=0$  - недопустимый вариант;  $K_i=0.5$  - ненормативное конструкторское решение;  $K_i=0.75$  - средний уровень конструкторского решения;  $K_i=1$  - нормативное конструкторское решение и т.д.

При задании  $K_i$  эксперту необходимо учитывать надежность структуры (глава 4). Наибольшему значению  $K_s$  будет соответствовать рациональный вариант структуры модуля.

На следующем этапе структурной оптимизации необходимо уточнить оставшееся множество вариантов на соответствие их основных параметров требуемым (заданным) значениям; а затем из тех вариантов, что соответствуют по параметрам, выбрать варианты с приемлимым уровнем надежности.

Все множество различных параметров данной структуры можно разделить на два подмножества: подмножество основных и подмножество неосновных параметров. Обычно первое подмножество задается заказчиком или условиями на проектирование. Важность и целесообразность параметров второго подмножества можно оценить методом групповой экспертной оценки.

Для оперативной оценки основных параметров данной структуры предложено воспользоваться обобщенным рациональным методом анализа функционирования сложных систем (механических, электронных, автоматических и т.д.). Суть метода заключается в записи (составлении), решении и анализе уравнения параметров данного узла (блока, модуля и т.д.) в безразмерном виде

$$\begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & 1 & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $Q'$  - собственный безразмерный вектор узла (блока и т.д.);

$Q$  - неизвестный безразмерный вектор (общий);

$P_{ij}$  - некоторый вторичный параметр при передаче сигнала от узла  $i$  к узлу  $j$ .

Метод позволяет анализировать параметры (входные, выходные) данного узла (блока, субмодуля и т.д.) по заданным параметрам входящих в его состав элементов. Этот метод применим только для предварительной оценки параметров структуры, так как позволяет учесть связь отдельных узлов системы в большинстве случаев только по информационной части сигналов, т.е. по части полного сигнала, в которой содержится информация об измеряемой (контролируемой) величине.

Выбор и оптимизация вариантов структур на данном этапе ведется из условия

$$P_{сфj} \rightarrow \max, \text{ при } q'_{i3} \geq q'_{i\text{треб}} \text{ или } (q'_{i3} < q'_{i\text{треб}}), \quad (4)$$

где  $P_{сфj}$  - уровень структурно - функциональной надежности  $j$ -го варианта структуры;

$q'_{i3}$  - значение  $i$ -го основного параметра  $j$ -й структуры;

$q'_{i\text{треб}}$  - заданное значение  $i$ -го основного параметра.

На следующем этапе оптимизацию вариантов проводят с учетом их неосновных параметров. Оценка степени важности неосновных параметров позволяет сократить до минимума их количество (потребляемая мощность структуры, напряжение питания и пр.). По этим параметрам из примерно равноценных вариантов выбираются рациональные. Такую оценку предложено давать методом групповой экспертной оценки.

На основании результатов анкетного опроса  $N$  экспертов для каждой структуры составляется матрица  $K$

$$\|K\| = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{m1} & K_{m2} & \dots & K_{mn} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $K_{ij}$  - оценка значимости  $i$ -го неосновного параметра  $j$ -м

экспертом. Полученные матрицы обрабатываются методами математической статистики.

Точечная оценка (обобщенное мнение  $\bar{B}_0$ ) для данной группы из  $N$  экспертов имеет вид

$$\bar{B}_0 = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n B_i, \quad (6)$$

где  $B_i$  - весовой коэффициент  $i$ -го частного параметра.

Дисперсия  $D(B)$  и среднее квадратическое отклонение  $s$

$$D(B) = 1/(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (B_i - \bar{B}_0)^2, \quad (7)$$

$$s = [D(B)]^{0.5}. \quad (8)$$

Прогнозируемые размеры области, в которую с заданной вероятностью  $P$  попадают значения прогнозируемой величины  $B_0$

$$\bar{B}_0 - t \cdot s/n^{0.5} \leq B \leq \bar{B}_0 + t \cdot s/n^{0.5}, \quad (9)$$

где  $t$  - величина подчиняется распределению Стьюдента и определяется по таблицам в зависимости от  $n-1$  и  $1-P$ .

Каждому анализируемому параметру присваивается ранг значимости  $r$ . Например, если первый параметр имеет размеры области  $0,1 \leq B < 0,25$ , а второй,  $0,2 \leq B < 0,3$ , то соответственно их ранги  $r=2$  и  $r=1$ . Составляется общая матрица рангов неосновных параметров для всех структур  $\|r_{ij}\|$

$$\|r_{ij}\| = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $r_{ij}$  - ранг  $i$ -го параметра  $j$ -й структуры.

Дальнейшую оптимизацию предложено вести из условия

$$r_{ij} \rightarrow \min, \text{ при } q_{ij} \geq q_{i\min} \text{ или } (q_{ij} \leq q_{i\max}), \quad (11)$$

где  $q_{ij}$  - значение  $i$ -го неосновного параметра  $j$ -й структуры.

$q_{i\min}(q_{i\max})$  - некоторые наименьшее и наибольшее допустимые значения  $i$ -го параметра.

Рациональную стыковку отдельных предварительно синтезированных модулей производят повторяя всю процедуру для системы в целом. На заключительном этапе проектирования, с учетом результатов полигонных испытаний экспериментальных образцов, оптимальная структура ТСБ должна отвечать следующей системе условий

$$\begin{aligned} & P_{резj} \geq P_{треб}, & (12) \\ & \text{при } q'_{1j} \geq q'_{1треб} \text{ или } (q'_{1j} \leq q'_{1треб}); \\ & q''_{1j} \geq q''_{imin} \text{ или } (q''_{1j} \leq q''_{imax}), \end{aligned}$$

где  $P_{резj}$  - результирующая надежность  $j$ -го ТСБ (основная функция цели),  $i=1, \dots, n$ ;  $j=1, \dots, m$ ;

$P_{треб}$  - требуемая надежность ТСБ.

Выбор рациональных вариантов структур на всех этапах проектирования проводят по схеме, изображенной на рис.3.

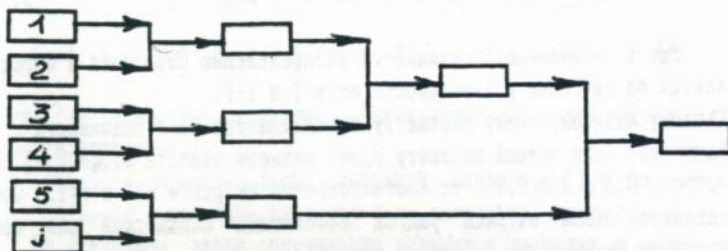


Рис.3. Схема выбора рационального варианта структуры.

Третья глава посвящена разработке концепции оценки результирующей надёжности ТСБ по её составляющим. В ней изложен общий подход к обоснованию и оценке каждой составляющей с учетом анализа видов отказов, особенностей структуры, характера режимов функционирования ТСБ и эксплуатации в целом. Всё изложенное в этой главе не противоречит ГОСТ 27.003-90 "Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности" и ГОСТ 27.002-89 "Надёжность в технике. Термины. Определения", а так-же основным положениям теории надёжности.

Анализ действия существующих ТСБ показал, что для подавляющего большинства случаев данные устройства являются нерезервируемыми и восстанавливаемыми по своему функционированию в режиме ожидания и

невосстанавливаемыми в режиме исполнения. В режиме ожидания (дежурный режим) система контролирует ситуацию и при появлении признаков опасных и вредных производственных факторов подает сигнал оповещения и (или) команду на исполнительное действие. В режиме исполнения (действия) ТСБ включается в активное действие с целью устранения или блокирования опасных и вредных факторов. Это характерно не только для автоматических, но и для неавтоматических систем безопасности. С учетом такого подхода уточнены понятия функционального, параметрического и эксплуатационного отказов. Установлена целесообразность оценки результирующей надежности по её составляющим. Исходя из видов отказов, особенностей структуры и функционирования ТСБ, а так же дальнейшей эксплуатации по назначению, результирующая надежность разделена на три основные составляющие: структурно-функциональную ( $R_{сф}$ ), параметрико-точностную ( $R_{пт}$ ) и эксплуатационно-прочностную ( $R_{эп}$ ) составляющие (надежности). Такое разделение обусловлено так же необходимостью, в отличие от надежности многих других технических систем, учитывать финальный результат действия ТСБ, т.е. устранение опасной ситуации.

Предложено результирующую надежность ( $R_{рез}$ ) определять как произведение независимых событий:

$$R_{рез} = R_{сф} \cdot R_{пт} \cdot R_{эп} \cdot R_{ож} \cdot R_{исп} \cdot R_{эксп}, \quad (13)$$

где  $R_{сф}$ ,  $R_{пт}$ ,  $R_{эп}$  - соответственно, структурно-функциональная, параметрико-точностная и эксплуатационно-прочностная составляющие надежности;

$R_{ож}$ ,  $R_{исп}$ ,  $R_{эксп}$  - соответственно, надежности в режиме ожидания, исполнения и период эксплуатационно-профилактического обслуживания (безопасность дальнейшей эксплуатации).

При таком подходе, под структурно-функциональной составляющей результирующей надежности (СФН), следует понимать надежность функционирования ТСБ в зависимости от его структурных качеств и свойств. Эта надёжность обусловлена качеством структуры при функционировании отдельных подсистем (модулей) и их элементов в режиме ожидания. Под параметрико-точностной составляющей (ПТН) следует понимать надежность ТСБ в процессе устранения опасной ситуации, обусловленную не выходом за расчётные допуски параметров системы. Установлено, что общая параметрико-точностная надежность зависит от надежности по временному, силовому и масштабному факторам.

Предложено к расчету параметрико-точностной надежности подходить как к расчету вероятности нахождения каждого из параметров  $y_1(t)$  в пределах  $A_1$  и  $A_2$ :

$$P_1(t) = P_1(A_1 \leq Y_{10}(t) \leq A_2). \quad (14)$$

С учетом допуска на отклонение параметра

$$P_1(t) = P_1(Y_1 - \Delta_1 \leq Y_1(t) \leq Y_1 + \Delta_2), \quad (15)$$

где  $Y_1(t)$  - функциональный параметр;

$Y_{10}$  - номинальное значение параметра;

$\Delta_1, \Delta_2$  - допуски на отклонение.

Тогда, принимая во внимание все факторы (временной, силовой и масштабный), условие (15) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= P_1(T_{10} - \Delta_1 \leq T_1(t) \leq T_{10} + \Delta_2) \\ P_1(F)(t) &= P_1(F_{10} - \Delta_1 \leq F_1(t) \leq F_{10} + \Delta_2) \\ P_1(Q)(t) &= P_1(Q_{10} - \Delta_1 \leq Q_1(t) \leq Q_{10} + \Delta_2) \end{aligned} \quad (16)$$

где  $T_1(t), F_1(t), Q_1(t)$  - соответственно функциональные параметры временного, силового и масштабного факторов.

Общая ПТН по вероятности безотказной работы:

$$P_{\text{опт}} = P_{TA} \cdot P_{FA} \cdot P_{QA}, \quad (17)$$

где  $P_{TA}, P_{FA}, P_{QA}$  - соответственно, вероятности безотказной работы ТСБ при устранении опасной ситуации с учетом требуемой точности  $A$  по всем временным  $T_1(t)$ , силовым  $F_1(t)$  и масштабным  $Q_1(t)$  параметрам.

Для аналитической оценки следует использовать выражение

$$P_{\text{опт}} = \prod_{i=1}^n [0,5 - \Phi(Z_i)], \quad (18)$$

где  $n$  - число независимых параметров, уход за допуск которых приводит к отказу ТСБ,

$\Phi(Z_i)$  - интеграл вероятности.

Для практических расчетов предложено использовать статистические данные полигонных испытаний опытных образцов и находить вероят-

ность безотказной работы по каждому фактору и следующих выражений

$$P_{TA} = (N_0 - p_{TA})/N_0, \quad (19)$$

$$P_{FA} = (N_0 - p_{FA})/N_0, \quad (20)$$

$$P_{QA} = (N_0 - p_{QA})/N_0, \quad (21)$$

где  $N_0$ -общее число испытаний ТСБ в режиме исполнения;

$p_{TA}, p_{FA}, p_{QA}$  - соответственно, число постепенных отказов ТСБ в режиме исполнения по временному, силовому и масштабному факторам, причем, отказом необходимо считать выход любого фактора (параметра) за его пределы.

При определении результирующей надежности ТСБ необходимо учитывать эксплуатационно-прочностную (составляющую) надежность (ЭПН). Эта надежность обусловлена постепенными отказами в процессе эксплуатации системы по назначению, которые вызваны необратимыми процессами силового, теплового, износосового или другого характера. В результате этих процессов в элементах системы возникают напряжения. Когда величина этих напряжений превышает некоторую предельную величину, то будет иметь место эксплуатационно-прочностной отказ. Оценку ЭПН деталей, их сопряжений и их соединений рекомендуется производить по заданному критерию прочности, износостойкости, теплостойкости и т.д. показателем вероятности безотказной работы  $P_{ЭП}$ . При этом показатель  $P_{ЭП}$  по заданному критерию  $Y$  находим через квантиль нормированного нормального распределения  $U_p$ .

$$U_p = [\bar{Y}_{lim} - \bar{Y}] / [S^2_{Y_{lim}} - S^2_Y]^{0.5}, \quad (22)$$

где  $\bar{Y}_{lim}, \bar{Y}$  - соответственно среднее значение предельного и расчетного параметров критерия  $Y$ ;

$S_{Y_{lim}}, S_Y$ -соответственно, средние квадратические отклонения двух случайных величин  $Y_{lim}$  и  $Y$ .

Предельные величины расчетных параметров выбирают по нормативным, справочным данным или устанавливают путем испытаний (наблюдений) в эксплуатации.

Для отдельных видов ТСБ такой подход к оценке ЭПН не отражает сути вопроса. В процессе эксплуатации эти ТСБ могут не испытывать сколько-нибудь значительных механических, тепловых и др. нагрузок (например, звукоизолирующая кабина оператора линии станков с ЧПУ). В этом случае речь идет о влиянии на ТСБ опасного и вредного произ-

водственного фактора в процессе всего срока эксплуатации данного средства безопасности по назначению. Поэтому, надежность таких ТСБ будет выражаться степенью ослабления интенсивности действующего фактора до пределов нормативных значений.

Для таких ТСБ вероятность безотказной работы  $P_{эп}$  предложено находить из условия

$$P_{эп} = P(Z_d < Z_{lim}), \quad (23)$$

где  $Z_d$  - значение действующего параметра опасного и вредного производственного фактора после установки ТСБ;

$Z_{lim}$  - допустимое значение параметра опасного и вредного производственного фактора.

Значения  $Z_{lim}$  (допустимый уровень шума, вибрации, ультрафиолетового излучения и пр.) необходимо выбирать из соответствующих ГОСТов ССБТ, санитарных норм и др. нормативных документов.

Значение  $Z_d$  определяются путем измерений (испытаний) непосредственно по месту установки ТСБ. При этом зависимость параметра  $Z_d$  необходимо представлять в виде:

$$Z_d = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (24)$$

где  $X_1, X_2, \dots, X_n$  - случайные факторы.

Принимая во внимание требования ГОСТ 27003-90 получено выражение коэффициента готовности ТСБ:

$$P_{сф} = P_{ож} = K_{гтсб} = t_{рож} / (t_{рож} + t_{прож}), \quad (25)$$

где  $K_{гтсб}$  - коэффициент готовности ТСБ;

$t_{рож}$  - суммарное время исправной работы ТСБ в режиме ожидания,

$t_{прож}$  - суммарное время вынужденного простоя, связанного с восстановлением ТСБ.

С учетом ПТН уточнено выражение коэффициента оперативной готовности  $K_{ог}$ :

$$K_{ог} = K_{гтсб} \cdot P_{опт}, \quad (26)$$

где  $K_{ог}$  - коэффициент оперативной готовности обобщенный;

$P_{опт}$  - общая ПТН с учетом всех факторов (масштабного, силово-

го, временного);

Учитывая ЭПН ( $P_{ЭП}$ ) уточнено выражение коэффициента сохранения эффективности  $K_{ЭФ}$

$$K_{ЭФ} = K_{огр} \cdot P_{ЭП} . \quad (27)$$

В итоге третьей главы обобщены предпосылки, гипотезы и принятые допущения разработанной концепции оценки результирующей надежности ТСБ.

В четвертой главе описана методика определения СФН ТСБ для различных этапов проектирования. Эта методика включает качественную оценку структурной надежности, качественную оценку структурно-функциональной надежности, качественно-количественную оценку структурно-функциональной надежности и количественную оценку структурно-функциональной надежности, а также определение оптимального структурного резерва при заданном  $M$  числе ограничений.

Предложено для самых ранних этапов проектирования ТСБ, когда отсутствует количественная информация о надежности элементов системы, оценку уровня надежности производить по качественным показателям структурной надежности. К таким показателям относятся:

1. Связность структуры,  $\|t_{1j}\|$ .
2. Избыточность структуры,  $R$ .
3. Показатель недоиспользования,  $E^2$ .
4. Компактность структуры,  $Q$ ;  $Q_{отн}$ ;  $D$ .
5. Степень централизации в структуре,  $\delta$ .
6. Ранг  $k$ -го элемента,  $R_k$ .
7. Центр графа структуры,  $P$ ;  $e(x)$ .

Определение этих показателей дано на базе структурного анализа и оценки качества структуры системы.

На следующем этапе качественную оценку СФН целесообразно проводить с учетом  $i$ -го состояния элемента структуры по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^k N_i \cdot P_i , \quad (28)$$

где  $N_i$  - возможное состояние элемента,  $i=1, \dots, k$ ;

$P_i$  - событие, при котором система находится в исправном состоянии с учетом состояния рассматриваемого элемента  $N_i$ .

Принимая число элементов равное  $n$ , необходимо после рассмотрения очередного элемента, производить анализ возможности или невозможности наступления события  $P_i$  по гипотезе  $N_i$ . Если окажется, что

событие  $P_1$  невозможно, то его исключают из формулы. По составленным структурно-функциональным формулам (28) проводят анализ, качественную оценку и отбор рациональных структур.

По мере дальнейшего проектирования системы объем исходной информации на каждом этапе увеличивается и уточняется. Поэтому, можно говорить о переходе от качественной оценки СФН к количественной. Переходной может служить качественно-количественная оценка, когда имеется минимум количественной информации. Такая оценка возможна только на базе анализа качества структуры и качественной оценки структурной надежности. Определив число путей с данным количеством ребер  $A_i$  и зная число звеньев пути  $i$  в рассматриваемой структуре, можно определить среднее время безотказной работы  $T_{ср}$  системы из равнонадежных элементов по формуле:

$$T_{ср} = 1/\lambda \sum_{i=1}^n [A_i/i] = t_{ср} \sum_{i=1}^n [A_i / i], \quad (29)$$

где  $\lambda$  - интенсивность отказов элемента системы;

$t_{ср}$  - среднее время безотказной работы элемента системы.

В случае разнонадежных элементов среднее время безотказной работы системы  $T_{ср}$  находится из формулы:

$$T_{ср} = \sum_{i=1}^k [A_i / \sum_{j=1}^m \lambda_{j1}] = \sum_{i=1}^k [A_i / \Lambda], \quad (30)$$

где  $\sum_{i=1}^k$  - сумма числа путей между входом и выходом;

$\sum_{j=1}^m$  - сумма числа звеньев  $i$ -го пути;

$\lambda_{j1}$  - интенсивность отказов  $j$ -го элемента (звена) в  $i$ -м пути;

$\Lambda$  - суммарная интенсивность отказов  $i$ -го пути.

Таким образом, для качественно-количественной оценки СФН варианта ТСБ, с разнонадежными элементами предложено использовать следующее основное неравенство:

$$T_{ср} > 1/[\Psi_{max} \cdot \lambda_{max}], \quad (31)$$

где  $\Psi_{max}$  - максимальное число звеньев в  $i$ -м пути;

$\lambda_{max}$  - максимальная интенсивность отказов, присущее системе (пути). На заключительном этапе оценку СФН предложено давать коли-

чественно с учетом особенностей функционирования ТСБ.

Учитывая принятую декомпозицию ТСБ на модули и все принятые в главе 3 допущения, размеченный граф состояний ТСБ в режиме ожидания (без учета устройства контроля (УК)) будет иметь вид, изображенный на рис.4.

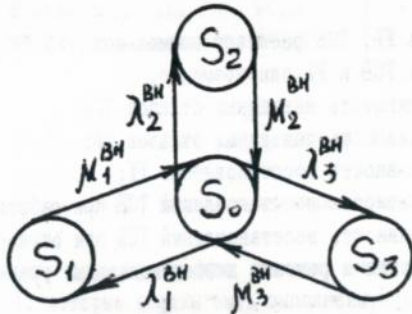


Рис.4. Граф состояний ТСБ в режиме ожидания.

При учете УК граф состояния ТСБ примет вид, показанный на рис.5.

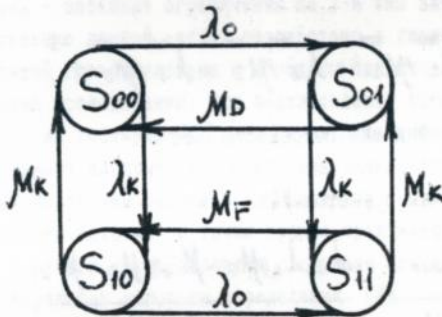


Рис.5. Граф состояний ТСБ в режиме ожидания с учетом УК.

На рис.4,5 приняты следующие обозначения:

$S_0$  - безотказные состояния ТСБ (все модули работоспособны);

$S_1$  - отказ модуля контроля (МК);

$S_2$  - отказ модуля формирования (МФ);

$S_3$  - отказ модуля исполнения (МИ);

$\lambda_1^{\text{вн}}, \lambda_2^{\text{вн}}, \lambda_3^{\text{вн}}$  - соответственно, интенсивности внезапных отказов модулей (МК), (МФ), (МИ);

вн вн вн

$\mu_1, \mu_2, \mu_3$  - соответственно, интенсивности восстановлений модулей (МК), (МФ), (МИ);

$S_{00}$  - работоспособное состояние ТСБ ( $S_0$ ) и УК;

$S_{01}$  - отказ ТСБ (отказал один из модулей  $S_1, S_2, S_3$ ), УК работает нормально;

$S_{10}$  - отказ УК, ТСБ работает нормально;

$S_{11}$  - отказ ТСБ и УК одновременно;

$\lambda_0$  - интенсивность внезапных отказов ТСБ;

$\lambda_k$  - интенсивность внезапных отказов УК;

$\mu_k$  - интенсивность восстановлений УК;

$\mu_D$  - интенсивность восстановлений ТСБ при работоспособном УК;

$\mu_F$  - интенсивность восстановлений ТСБ при отказе УК.

После составления и решения дифференциальных уравнений Колмо-

рова при  $t \rightarrow \infty$  и условии нормировки  $\sum_{j=0}^n P_j(t) = 1$  получены выражения

соответственно для первого случая:

$$P_0 = K_{гтсб} = (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_3 / \mu_3)^{-1}, \quad (32)$$

где  $K_{гтсб}$  - коэффициент готовности ТСБ.

Для второго случая с учетом УК:

$$K_{гтсб} = 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \mu_D} - \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_k (\mu_D - \mu_F) (\mu_D + \mu_k)}{\mu_D^2 \cdot \mu_k (\mu_F + \mu_k)}, \quad (33)$$

где  $K_{гтсб}$  - коэффициент готовности ТСБ с учетом УК.

В первом случае, когда модули также являются восстанавливаемыми системами  $K_{г}$  будет иметь вид:

$$K_{гтсб} = [1 + (1/K_{г1} - 1)(1/K_{г2} - 1)(1/K_{г3} - 1)]^{-1} \quad (34)$$

где  $K_{гj}$  - коэффициент готовности  $j$ -ой подсистемы (модуля).

В данной главе рассмотрен вопрос оптимального структурного резерва при произвольном числе ограничений. Сформулирована задача оп-

тимизации:

$$\left. \begin{aligned} P_c &\rightarrow \max, \\ W^1_c(x_1, x_2, \dots, x_m) &\leq W^1_{\text{доп}} \\ W^2_c(x_1, x_2, \dots, x_m) &\leq W^2_{\text{доп}} \\ W^j_c(x_1, x_2, \dots, x_m) &\leq W^j_{\text{доп}} \\ W^M_c(x_1, x_2, \dots, x_m) &\leq W^M_{\text{доп}} \end{aligned} \right\} \quad , \quad (35)$$

где

$$W^j_c(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m [w_{ji} \cdot x_i], \quad (36)$$

$w_{ji}$  - затраты  $j$ -го типа, связанные с одним элементом  $i$ -го участка.

$M$  - число ограничений по данному виду ресурсов (стоимости, массе и т.д.), которые должны быть выполнены одновременно.

$W^j_c(x_1, x_2, \dots, x_m)$  - затраты  $j$ -го типа на систему в целом, при условии, что на  $i$ -м участке имеется  $x_i$  резервных элементов, на  $m$ -м участке имеется  $x_m$  резервных элементов.

$W^j_{\text{доп}}$  - заданные ограничения на  $j$ -й тип затрат.

Решение данной задачи разработано в главе 5.

В пятой главе изложены и обобщены практические результаты теоретических исследований. Для подтверждения работоспособности данных методик и их тестирования рассмотрен практический пример применения разработанных алгоритмов. Приведены данные внедрения результатов и основных положений работы в производство.

Наиболее важным, с точки зрения практического выхода работы в целом, в данной главе являются следующие моменты:

1. Разработан алгоритм определения СФН (составляющей) ТСБ на этапах их проектирования.
2. Разработан алгоритм определения результирующей надежности ТСБ.
3. Разработан алгоритм и программное обеспечение для поиска оптимального резерва ТСБ при заданных  $M$  ограничениях.
4. Для оценки эффективности использования данных методик рассмотрен практический пример определения результирующей надежности конкретного ТСБ - автоматической установки пожаротушения АСПП-1. Полученные результаты расчетов сопоставимы с результатами статистического анализа надежности, приведенными в литературных источниках, рассмотренных в диссертации.
5. Приведены результаты внедрения данных методик в производство.

В Заключении приведены рекомендации для более широкого внедрения результатов работы в производство. Отмечена сложность оценки экономического эффекта от внедрения результатов работы, в т.ч. необходимость учета социального фактора.

На основании выполненных теоретических исследований сделаны следующие общие выводы:

1. Разработаны методология, методы расчета и методика оценки надежности ТСБ на этапах проектирования. Отличительной особенностью оценки надежности ТСБ от оценки надежности других технических систем, является, прежде всего, необходимость комплексного подхода и разделения общей (результатирующей) надежности на составляющие. Таковыми составляющими целесообразно принять структурно-функциональную, параметрико-точностную и эксплуатационно-прочностную.

2. Предложено на ранних этапах проектирования, в качестве критерия эффективности разрабатываемого ТСБ, рассматривать СФН. Этот критерий достаточен и для оптимизации структур ТСБ на указанных этапах. СФН полностью характеризует надежность ТСБ в режиме ожидания (дежурный режим), когда, в основном, преобладают внезапные отказы. Эти отказы обусловлены структурными недоработками системы и пороками ее схемных решений и характеризуют надежность функционирования ТСБ.

3. В данной работе предложены методы оценки СФН, которые базируются на теории графов, теории массового обслуживания и марковских случайных процессов, алгебре логики и структурном анализе технических систем. Благодаря применению структурного анализа стало возможным дать качественную оценку СФН для самых ранних этапов проектирования, когда отсутствуют количественные данные о надежности подсистем и элементов вновь разрабатываемых систем. Переходим от качественных к количественным методам может служить предложенный метод качественно-количественной оценки СФН. Окончательная оценка СФН дается по количественным показателям, которые могут быть найдены методами теории массового обслуживания на основе статистических данных о надежности элементов.

4. В работе предложена концепция общего подхода к проектированию ТСБ, когда на каждом этапе дается оценка надежности варианта структуры, служащая критерием его дальнейшей оптимизации. На заключительном этапе проектирования должна даваться оценка результирующей надежности разрабатываемого ТСБ. Такая оценка включает опреде-

ление СФН, ПТН и ЭПН.

5. Рекомендовано ПТН оценивать по результатам специальных полигонных (лабораторных) испытаний опытных образцов с учетом финального результата ликвидации системой опасной ситуации. Отказом в этом случае необходимо считать не только отсутствие данного параметра, но и выход его за допустимые пределы. Подавляющее число отказов при этом носит постепенный характер.

6. ЭПН рекомендовано определять по известным данным предельных нагрузок отдельных элементов, которые, в свою очередь, должны находиться по нормативным или справочным данным, а также путем испытаний (измерений) или наблюдений в эксплуатации. Эти отказы имеют также постепенный характер.

7. Значительное место в работе уделено анализу состояния проблемы и существующим положениям в современной теории надежности, а также методам анализа и синтеза предварительно сформированных структур. В основе концепции данной работы лежит системный подход к проектированию, базой которого является автоматизированное проектирование и оптимизация структур по критерию надежности на всех этапах разработки ТСБ.

8. Разработано необходимое алгоритмическое и программное обеспечение расчетов уровня надежности ТСБ.

9. В результате проделанных теоретических исследований намечены пути дальнейшего развития и детализации концепции оценки надежности ТСБ по составляющим, в частности, весьма проблематично аналитическая оценка ПТН и ее отдельных компонент, а также необходима разработка вопросов оптимизации технического обслуживания, оперативного диагностирования и поиска отказов для данных систем.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Леонов А.А. Системы безопасности в гибком автоматизированном и гибком автоматическом производствах // Современные проблемы обеспечения пожаробезопасности и пожаротушения в замкнутых пространствах ; Тезисы доклад. Республ. научн.-техн. конф. - Севастополь, 1991. - с. 68-69.

2. Леонов А.А. Типизация и классификация средств безопасности // Современные проблемы экологического приборостроения ; Тезисы докл. Республ. научн.-техн. конф. - Севастополь, 1991. - с. 55-56.

3. Севриков В.В., Леонов А.А., Добровольская Е.В. Надежность и эффективность технических средств безопасности // Современные проблемы

439788

обеспечения пожаробезопасности и пожарной безопасности в земных условиях; Тезисы докл. Республ. научн.-техн. конф. - Севастополь, 1991. - с.33.

4. Леонов А.А. Надежность технических средств безопасности//Проблемы экологического мониторинга и охраны труда: Тезисы докл. 3-й Междунар. научно-техн. конф. - Севастополь, 1995. - с.110.

5. Леонов А.А. Структурно-функциональная надежность технических средств безопасности//Проблемы экологического мониторинга и охраны труда: Тезисы докл. 3-й Междунар. научно-техн. конф. - Севастополь, 1995. - с.111.

6. Леонов А.А., Севриков И.В., Азаренко Е.И. Классификация технических средств безопасности при оценке их надежности и эффективности. //Вестник СевГТУ. Выпуск 3: Механика, энергетика, экология/ Сборник научн. трудов под ред. А.И. Бохонского/ - Севаст. гос. техн. ун-т. - Севастополь, 1996. - 140 с.

7. Шиян В.Г., Карпенко В.А., Леонов А.А. Концепция построения систем ранней диагностики и прогноза развития предаварийных ситуаций на взрывопожароопасных и пожароопасных энергоемких объектах. //Вестник СевГТУ. Выпуск 3: Механика, энергетика, экология/ Сборник научн. трудов под ред. А.И. Бохонского. Севаст. гос. техн. ун-т. - Севастополь, 1996. - 33с.

8. Леонов А.А. Результирующая надежность технических средств безопасности. //Проблемы охраны труда и техноэкологической безопасности: Тезисы докл. 4-й Междунар. научно-техн. конф. - Севастополь, 1996.

9. Леонов А.А., Телегина А.Л., Азаренко Е.И. Эксплуатационно-прочностная надежность технических средств безопасности//Проблемы охраны труда и техноэкологической безопасности: Тезисы докл. 4-й Междунар. научно-техн. конф. - Севастополь, 1996.

СОИСКАТЕЛЬ