

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

## **Теория надежности системы УВД**

Методические указания и контрольные задания  
Для студентов У курса заочного факультета специальности  
«Эксплуатация воздушных судов и  
организация воздушного движения»  
специализации «Организация воздушного движения»

Санкт-Петербург

2004

Одобрено и рекомендовано к изданию  
Методическим советом Академии

Ш 87 (03)

Теория надежности систем УВД: Методические указания и контрольные задания / Академия ГА. С. – Петербург, 2004.

Издаются в соответствии с программой дисциплины «Теория надежности систем УВД» (объем 30 ч, X семестр).

Предназначены для студентов 3Ф специализации УВД.

Ил. 11, табл. 5, библи. 7 назв.

Составитель В.Г. Кизько, канд. техн. наук доц.

Рецензент О.А. Евтушенко, канд. техн. наук доц.

**Программа дисциплины**  
**«Теория надежности системы УВД»**

*Рекомендуется Методическим советом Академии ГА  
для студентов заочного факультета  
специализации «Организация воздушного движения»  
специальности 240300 «Эксплуатация воздушных судов  
и организация воздушного движения»  
направления подготовки 658100 «Аэронавигация»*

### 1. Цели и задачи дисциплины

Получение студентами необходимых и достаточных знаний по оценке надежности элементов системы УВД и деятельности диспетчера при УВД. Содержание дисциплины раскрывает основные понятия, факторы и условия безопасного управления воздушного движения. На основании инженерных расчетов и структурной типовой схемы оценивать функциональную и операционную надежность диспетчера в системе УВД.

#### Требования к уровню освоения содержания дисциплины

На основании полученных знаний по дисциплинам «Основы теории УВД», «Теории вероятностей и математической статистики», «Технологических процессов управления воздушным движением» и данной дисциплины - специалист (выпускник Академии ГА) должен знать:

- факторы и условия безопасной деятельности диспетчера в системе УВД;
- критерии оценки надежности;
- методы оценки надежности операторской деятельности.

Иметь навыки:

- анализа надежности деятельности диспетчера.

Уметь:

- рассчитывать характеристики надежности технологических процессов;
- оценивать загруженность и надежность операторской деятельности.

Иметь представление:

- о надежности системы УВД;
- о моделирование операторской деятельности.

### 2. Содержание дисциплины

#### 2.1. Тематический план

№ п/п	Разделы дисциплины	Лекции	ПЗ (или С)	ЛР
1.	Тема 1. Основные понятия и надежность	2	-	-
2.	Тема 2. Анализ опасностей	2	2	-
3.	Тема 3. Надежность человека в системе управления	2	2	-
4.	Тема 4. Функциональная надежность человека	8	8	-
5.	Тема 5. Надежность системы УВД	2	2	-

## 2.2. Содержание дисциплины

### Тема 1. Основные понятия и надежность

Историческая справка. Надежность. Безопасность. Риск.

### Тема 2. Анализ опасностей

Аспекты безопасности. Предварительный анализ безопасности.

### Тема 3. Надежность человека в системе управления

Ошибки человека. Причины ошибок. Критерии оценки деятельности человека.

### Тема 4. Функциональная надежность человека

Основные операции деятельности. Алгоритмическое описание. Типовые блоки. Дерево решений и расчетные формулы.

### Тема 5. Надежность системы УВД

Пространство состояний системы. Системные показатели надежности. Системы обеспечения безопасности.

### Практические занятия

#### Тема 2.

- Расчет характеристик надежности.

#### Тема 3.

- Вероятностные, временные и операционные характеристики выполнения операций.

#### Тема 4.

- Расчет функциональной надежности оператора.
- Расчет операционной надежности оператора.

#### Тема 5.

- Оценка эффективности работы элементов авиатранспортной системы.

## 3. Темы, обеспечивающие индивидуализацию обучения студентов (реферат)

Зависимость эффективности работы человека от уровня нагрузок.

Функция надежности работы человека в непрерывной временной области.

Функция надежности работы человека в пиковой временной области.

Влияние пиковых периодов на надежность человека.

## 4. Тематика УИРС

Анализ свойств системы УВД. Экономическая эффективность устранения опасностей. Критериальные оценки деятельности диспетчера. Влияние быстротечности процессов УВД на загруженность диспетчера.

## 5. Лабораторный практикум – не предусмотрен.

## 6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Сакач Р.В. и др. Безопасность полетов. М.: Транспорт, 1989, -239 с.
2. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 1 / Академия ГА СПб, Академия ГА, 2003, 124 с.
3. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 2 / Академия ГА СПб, 2003, 116 с.
4. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 3 / Академия ГА СПб, 2003, 109 с.
5. Кизько В.Г. Управление движением воздушных судов. Книга 4 / Академия ГА СПб, 2003, 112 с.

6. Кизько В. Г. Процессы управления воздушным движением. Часть 3. Анализ проблем УВД / Академия ГА, СПб, 2000, 70 с.

7. Безопасность полетов летательных аппаратов. Под редакцией А.И.Старикова. М.: Транспорт, 1988, 158 с.

### 7. Средства обеспечения освоения дисциплины

○ Использование MathCAD при выполнении практических занятий в компьютерном классе (ауд. 353).

## Методические указания

### Тема 1. Основные понятия и надежность

*Историческая справка. Надежность. Безопасность. Риск.*

*Литература: [1, с. 4-6, 41-55].*

После первой мировой войны в связи с увеличением интенсивности полетов и авиационных катастроф были выработаны критерии надежности для самолетов и требования к уровню безопасности. К 1960 г., например, было установлено, что одна катастрофа приходится в среднем на 1 млн. посадок. Таким образом, для автоматических систем посадки самолетов можно было бы установить требования по уровню риска, не превышающего одной катастрофы на  $10^7$  посадок.

60-е годы. Начало космической эры. Был предложен новый принцип анализа с помощью дерева отказов в качестве программы для оценки надежности систем управления.

70-е годы. Интенсивная работа по оценке риска, связанного с эксплуатацией атомных электростанций. В США введены законы об охране здоровья на производстве, а также об ответственности за качество продукции.

*Надежность* – одно из свойств качества продукции. Это свойство изделий проявляется в процессе использования изделий по назначению и рассматривается, как свойство изделия сохранять качество во времени.

Понятие *надежность* может относиться не только к изделиям, но и к системам «человек – машина», к информационно-управляющим системам, к программному обеспечению.

Словарным значением слова *риск* является «*возможность человеческих жертв и материальных потерь или травм и повреждений*». С точки зрения надежности, данное определение звучало так «*вероятность человеческих и материальных потерь и повреждений*».

Например, риск для любого человека из 200-миллионного населения США погибнуть в течение года в автомобильных катастрофах составляет

$$\frac{50 \text{ тыс. смертельных исходов в год}}{200 \text{ млн. человек}} = 2,5 \times 10^{-4} \frac{\text{смертельных исходов}}{\text{в год на человека}},$$

т.к. суммарное годовое число смертельных случаев в автомобильных катастрофах в США равняется 50 тыс. Риск может иметь не смертельный исход, поэтому общим выражением является

$$\text{риск} \left[ \frac{\text{последствие}}{\text{время}} \right] = \text{частота} \left[ \frac{\text{событие}}{\text{единица времени}} \right] \text{величина} \left[ \frac{\text{последствие}}{\text{событие}} \right].$$

Для примера с автомобильными авариями при общем числе аварий, равном в США 50 млн. в год, число катастроф (смертельных исходов /авария) равно  $10^{-3}$ , так как

$$50000 \frac{\text{смертельных случаев}}{\text{год}} = \left( 50 \times 10^6 \frac{\text{аварий}}{\text{год}} \right) \left( 10^{-3} \frac{\text{смертей}}{\text{аварий}} \right).$$

Для общества риск понести материальные потери от автомобильных аварий можно выразить так:

$$\text{риск} \frac{\text{потери}}{\text{время}} = \text{частота} \frac{\text{аварий}}{\text{время}} \text{величина} \frac{\text{потери}}{\text{аварий}}.$$

Безопасность – состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз.

Жизненно важные интересы – совокупность потребностей, удовлетворение которых надежно обеспечивает существование и возможности прогрессивного развития личности, общества и государства.

Угроза безопасности – совокупность условий и факторов, создающих опасность жизненно важным интересам личности, общества и государства.

Безопасность полетов – комплексная характеристика воздушного транспорта и авиационных работ, определяющая способность выполнять полеты без угрозы для жизни и здоровья людей.

Безопасность использования воздушного пространства – комплексная характеристика установленного порядка использования воздушного пространства, определяющая его способность обеспечить выполнение всех видов деятельности по использованию воздушного пространства без угрозы жизни и здоровью людей, материального ущерба государству, гражданам и юридическим лицам.

Безопасность движения как свойство транспортной системы характеризуется уровнем безопасного движения, который определяется вероятностью того, что при движении не возникает такая особая ситуация, как катастрофическая.

При разработке современной системы обеспечения безопасности движения в ее основу закладываются:

- новые достижения науки и техники;
- достижения передового опыта по управлению качеством и повышению эффективности производства;
- автоматизация и механизация всех технологических процессов.
- 

### Характеристики надежности

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в заданном интервале  $t$  в системе или в элементе не возникнет отказ. Эта характеристика связана с функцией распределения времени безотказной работы следующим соотношением

$$P(t) = 1 - Q(t),$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы,  $Q(t)$  – функция распределения времени безотказной работы, которая представляет собой вероятность появления отказа в течение времени  $t$ .

Очевидно, что  $P(t) = P(T > t)$ ,  $P(0) = 1$ ,  $P(\infty) = 0$  и является не возрастающей функцией времени.

Для определения величины  $P(t)$  используется следующая статистическая оценка

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \approx \frac{N(t)}{N_0},$$

где  $N_0$  – число изделий, поставленных на испытание,  $n(t)$  – число изделий, отказавших в течение времени  $t$ ,  $N(t)$  – число изделий, исправно работающих в интервале  $[0, t]$ .

Вероятность отказа

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t).$$

$$Q \approx \frac{n_k}{N_0}.$$

Частота отказов - плотность распределения времени безотказной работы или производная от вероятности безотказной работы, поэтому

$$A(t) = Q'(t) = -P'(t).$$

Для определения величины  $a(t)$  используется следующая статистическая оценка:

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t},$$

где  $n(\Delta t)$  – число отказавших изделий в интервале времени от  $(t-\Delta t/2)$  до  $(t+\Delta t/2)$ .

Между частотой отказов, вероятностью безотказной работы и вероятностью появления отказа имеются следующие зависимости:

$$Q(t) = \int_0^t a(x) dx; \quad P(t) = 1 - \int_0^t a(x) dx.$$

Среднее время безотказной работы. Под этим термином в теории надежности понимается математическое ожидание времени исправной работы:

$$T_{cp} = E[T] = \int_0^{\infty} tF'(t) dt.$$

Практически среднее время исправной работы однотипных элементов

$$T_{cp} \approx \frac{1}{N_0} \sum_{k=1}^{N_0} t_k,$$

где  $N_0$  – число элементов, над которыми проводятся испытания;  $t_k$  – время исправной работы  $k$ -го элемента.

Так как трудно определить  $t_k$ , удобнее пользоваться другим выражением:

$$T_{cp} \approx \frac{1}{N_0} \sum_{k=1}^m n_k t_{cpk},$$

где  $t_{cpk} = 0,5(t_{k-1} + t_k)$ ;  $m = \frac{t}{\Delta t_k}$ ;

$t$  – время, в течение которого вышли из строя все элементы;  $\Delta t_k$  – величина интервала времени.

Величина  $T_{cp}$  позволяет определить количество запасных элементов за время работы, но полностью не характеризует надежность элементов.

Среднее время отказов - математическое ожидание исправной работы между соседними отказами:

$$t_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n t_k,$$

где  $n$  – число отказавших элементов;  $t_k$  – время исправной работы между  $(k-1)$ -м и  $k$ -м отказом аппаратуры.

Интенсивность отказов - отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, продолжающих работать, есть интенсивность отказов ( $\text{ч}^{-1}$ )

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{N(t)\Delta t},$$

где  $n(t)$  – число отказавших элементов в отрезке времени от  $t - \frac{\Delta t}{2}$  до  $t + \frac{\Delta t}{2}$ ,  $N(t) = 0,5(N_{k-1} + N_k)$ ;  $N_{k-1}$  – число исправных элементов в начале интервала времени  $\Delta t$ ;  $N_k$  – число исправно работающих элементов в конце интервала  $\Delta t$ . Интенсив-

ность отказов называют  $\lambda$ -характеристикой, т.о. интенсивность отказов показывает, какая часть элементов выходит из строя в единицу времени по отношению к среднему числу исправно работающих элементов.

Основные законы, используемые в теории надежности

В теории надежности встречаются следующие законы распределения.

1. *Экспоненциальный закон.* Для него имеем следующие зависимости:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad P(t) = e^{-\lambda t};$$

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda},$$

где  $\lambda$  - параметр экспоненциального распределения.

Дисперсия времени безотказной работы равна

$$D = \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt - T^2 = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Если  $\lambda t = 1$ , то  $Q(t) \cong \lambda t = t/T$  и  $P(t) \cong 1 - \lambda t = 1 - t/T$ .

В случае экспоненциального закона  $P(t+\tau) = e^{-\lambda(t+\tau)}$  и  $P(t) = e^{-\lambda t}$ . Подставляя указанные выражения, получим, что  $P(\tau^{-\lambda\tau})$ . Таким образом, условная плотность вероятности равна безусловной плотности вероятности, что подтверждает справедливость данного свойства.

*Распределение экстремальных значений (или распределение Гумбеля):* выражение для плотности распределения, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов соответственно имеют вид

$$P(t) = e^t e^{-e^t};$$

$$T = e^{-e^t}.$$

Это распределение является наиболее подходящей моделью отказов механических элементов. Впервые оно было использовано Гумбелем для анализа данных о паводках и может описывать поведение многих механических элементов.

*Пример.* Предположим, что  $\lambda = 0,01 \text{ ч}^{-1}$ . Определим для  $y = 50 \text{ ч}$  значения  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $a(t)$ ,  $T$ .

$$P(50) = e^{-0,01 \cdot 50} = e^{-0,5} = 0,607;$$

$$Q(50) = 1 - P(50) = 0,393;$$

$$T = \frac{1}{\lambda} = 100 \text{ ч}; \quad a(50) = 0,01 e^{-0,01 \cdot 50} \approx 0,00607 \text{ ч}^{-1}.$$

2. *Нормальное распределение.* В случае, если  $\sigma < T_1$  (практически, если  $T_1 \geq 3\sigma$ ), что соблюдается в большинстве случаев для элементов, получим

$$Q(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}} dx;$$

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx;$$

$$a(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-T_1)^2}{2\sigma^2}\right],$$

где  $T_1$  и  $\sigma$  - параметры нормального распределения.

3. *Распределение Пуассона.* Возможные значения случайной величины для него  $0, 1, 2, \dots, n$ . Вероятность появления  $m$  событий равна

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}.$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны

$$M[m] = \lambda; \quad D[m] = \lambda,$$

где  $\lambda$  - параметр распределения.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение безопасности полетов.
2. Что такое безопасность движения?
3. Что входит в систему обеспечения безопасности полетов?
4. Дайте определение понятия «риск».
5. Какие законы используются в теории надежности?

## Тема 2. Анализ опасностей

*Аспекты безопасности. Предварительный анализ безопасности.*

*Литература: [6, с. 4-10].*

Показателем надежности является вероятность безотказной работы в течение определенного времени либо наработка на отказ – время безотказной работы.

Теория надежности утверждает, что абсолютно надежных систем нет и быть не может теоретически. Это означает, что надежность может быть сколь угодно высокой, но меньшей, чем 100%. В теории надежности утверждается, что чем сложнее система, т.е. чем из большего числа элементов она состоит, тем меньше ее надежность. Аналитически это выражается так:

$$P = p_1 p_2 \dots p_n \quad \text{или} \quad P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad \text{а при } p_1 = p_2 = \dots = p_n \quad P = p^n,$$

где  $P$  – вероятность безотказной работы системы;  $p_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Рассмотрим надежности на примере независимых систем пожаротушения. Из теории вероятностей известно, что вероятность наступления события, зависящего от нескольких независимых друг от друга причин, равна сумме вероятностей возникновения этих причин. Пусть имеется несколько автономных систем пожаротушения. Тогда вероятность срабатывания системы пожаротушения равна:

$$P = p_1 + (1 - p_1)p_2 + (1 - p_1)(1 - p_2)p_3 + \dots + (1 - p_1)(1 - p_2)\dots(1 - p_{n-1})p_n,$$

где  $P$  – вероятность достижения цели (пожар будет потушен);  $p_1, p_2, \dots, p_n$  – вероятность срабатывания систем пожаротушения;  $n$  - количество систем.

Данная формула справедлива при условии, что независимые системы вступают в действие последовательно и только при отказе предыдущих элементов.

Пример. Помещение оборудовано тремя системами пожаротушения. Вероятность срабатывания всех систем одинакова и равна 70%. Вероятность, что пожар будет потушен, равна

$$P = 0,7 + (1-0,7) \cdot 0,7 + (1-0,7) \cdot (1-0,7) \cdot 0,7 = 0,7 + 0,21 + 0,063 = 0,973.$$

Пусть вероятность срабатывания системы равна 0,9, тогда

$$P = 0,9 + (1-0,9) \cdot 0,9 + (1-0,9) \cdot (1-0,9) \cdot 0,9 = 0,9 + 0,09 + 0,009 = 0,999.$$

Таким образом, что даже из недостаточно надежных элементов можно построить достаточно надежную систему.

### Анализ и природа аварийности

Термин *авария* берет свое начало от арабского *avaq* – убыток, потери. Поэтому под аварией традиционно понимают непредусмотренные расходы или убытки от повреждения или сами технические повреждения. Такое определение не позволяет понять существо явления, установить его причинно-следственные связи, а, следовательно, и обусловленность этого явления.

Принято считать, что на морском транспорте около 10% аварий возникает в результате действий непреодолимой силы (темные силы природы), 15% являются следствием техни-

ческого несовершенства судов и внезапного отказа судового оборудования. Остальные 75% аварий принято относить к субъективным факторам. К субъективным факторам относят: пренебрежение мерами безопасности, отсутствие чувства ответственности, недостаточная профессиональная подготовка, нарушение требований нормативных документов и пр.

#### Предварительный анализ опасностей

Обычно одни отделения предприятия представляют большую опасность, чем другие, поэтому в самом начале анализа следует разбить предприятие на подсистемы, для того чтобы выявить такие участки производства или его компоненты, которые являются вероятными источниками неприятностей. Первыми тремя шагами являются:

Шаг 1. Выявить источники *опасности* (возможны ли утечки ядовитых веществ, взрывы, пожары и т.д.).

Шаг 2. Определить части системы, которые могут вызвать эти опасные состояния.

Шаг 3. Следует ввести ограничения на анализ. Например, не включать изучение опасностей в результате войны, землетрясения и др.

#### Предварительный анализ опасностей

Если задачи расширяются с использованием более формализованных (количественных) приемов, в том числе с включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасность в происшествие, а также корректирующих мероприятий для устранения последствий происшествия, то такая процедура называется *предварительным анализом опасностей*.

В аэрокосмической промышленности, например, опасности, после того как они выявлены, характеризуются в соответствии с вызываемыми ими последствиями.

Класс I – пренебрежимые эффекты.

Класс II – граничные эффекты.

Класс III – критические ситуации.

Класс IV – катастрофические последствия.

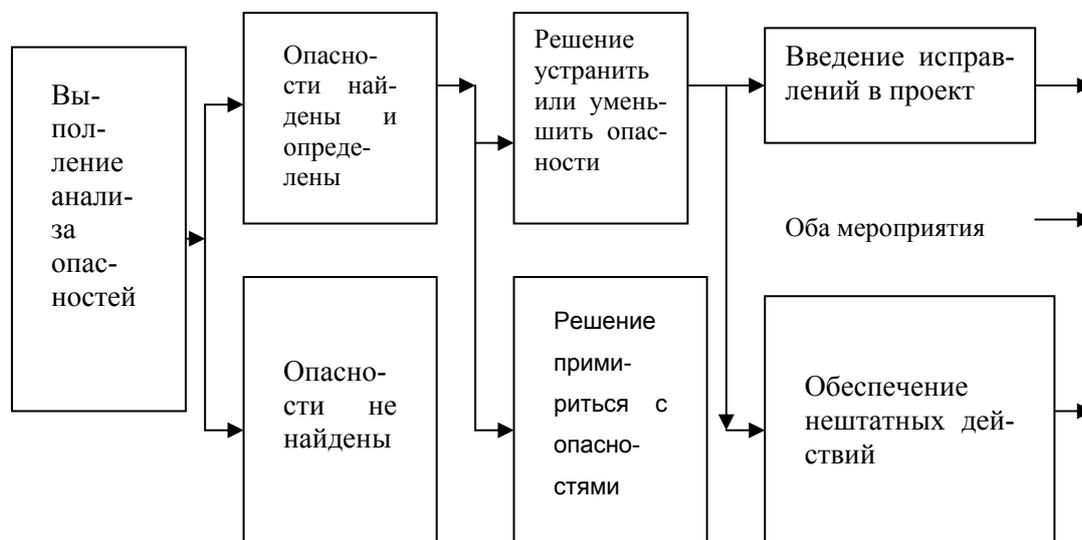


Рис. 2.1. Дерево решений

В основе существующей у нас ныне методологии расследования аварий лежит концепция перманентной вины работника. Эта концепция ничем не обоснована, но по сути своей антигуманная, так как приводит к репрессивности в дисциплинарной и судебной практи-

ке, к обесцениванию человеческой личности. При этом причинно-следственные факторы остаются не расследованными.

Методология расследований авиационных происшествий должна основываться на следующих принципах:

1. Искать нужно истину, а не вину. Ни в коем случае недопустима подмена этих понятий.
2. Состав экспертов должен быть независимым. Необходимо устанавливать не только «Что нарушено?», но и «Почему нарушено?».
3. В ходе расследования нужно установить: где, когда, как, кем и почему была допущена ошибка, какие обстоятельства способствовали этому?

Вопросы для самопроверки

1. Какие факторы контролируются и управляются диспетчером при УВД?
2. Какие факторы контролируются, но не управляются диспетчером при УВД?
3. Какие факторы не контролируются и не управляются диспетчером при УВД?
4. Какие шаги выполняются при предварительном анализе опасностей при УВД?
5. На каких принципах построена методология расследований АП при УВД?

### **Тема 3. Надежность человека в системе управления**

*Ошибки человека. Причины ошибок. Критерии оценки деятельности человека. Литература: [4, с. 65-86].*

*Надежность работы человека* определяется как вероятность успешного выполнения им работы или поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности времени.

*Ошибка человека* определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций.

#### Характер ошибок человека

Ошибки человека могут возникнуть в тех случаях, когда:

1. Оператор стремится к достижению ошибочной цели.
2. Поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действий оператора.
3. Оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

#### Причины ошибок человека

Среди основных причин ошибок человека можно выделить:

- неудовлетворительную подготовку или низкую квалификацию обслуживающего персонала, когда операторы или специалисты по техническому обслуживанию недостаточно подготовлены к выполнению поставленной задачи;
- следование обслуживающего персонала неудовлетворительным процедурам технического обслуживания или эксплуатации;
- плохие условия работы, связанные, например, с плохой доступностью оборудования, теснотой рабочего помещения или чрезмерной температурой;
- недостаточное стимулирование операторов или специалистов по техническому обслуживанию, не позволяющее оптимального уровня качества их работы.

Во многих случаях деятельность человека может быть представлена в виде дискретного процесса выполнения отдельных, последовательно расположенных во времени элементов, алгоритмов, блоков и т.д.

Все критериальные величины можно условно подразделить на три основные группы: вероятностные, временные и операционные.

#### *Вероятностные:*

- вероятность выполнения заданной операции (пропускная способность);

- вероятность того, что оператор занят;
- вероятность того, что занято заданное число операторов;
- вероятность того, что операторы загружены полностью;
- вероятность наличия очереди.

*Временные:*

- среднее время или средний период непрерывной занятости;
- среднее время занятости оператора;
- среднее время простоя оператора;
- среднее время полной загрузки;
- среднее время пребывания операции на выполнении (или в очереди).

*Операционные:*

- среднее число выполненных (невыполненных) операций;
- среднее число операций, подлежащих выполнению, но еще не выполняемых (длина очереди);
- среднее число операций, выполняемых одновременно;
- среднее число занятых (свободных) операторов.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается ошибка от промаха?
2. Какие характерные ошибки допускает диспетчер при УВД?
3. Основные причины нарушений правил полетов при УВД.
4. В каких единицах определяется загруженность диспетчера при УВД?
5. По каким критериям определяется загруженность диспетчера при УВД?

***Тема 4. Функциональная надежность человека***

*Основные формальные операции деятельности. Типовые блоки. Дерево решений и расчетные формулы. Алгоритмическое описание.*

*Литература: [3, с. 89-94]; [4, с. 65-86].*

Во многих случаях деятельность человека может быть представлена в виде дискретного процесса выполнения отдельных, последовательно расположенных во времени элементов, алгоритмов, блоков и т.д. Если для того или иного элемента существует совокупность условий, позволяющих однозначно говорить о существовании моментов времени начала данного воздействия в процессе деятельности человека и его окончания, то такой элемент может быть назван *операцией*. Таким образом, операцию можно трактовать как временной интервал, моменты начала и окончания которого определены в каждом конкретном случае совокупностью заданных условий. В комплекс условий, определяющих существование моментов начала и окончания операций, помимо смыслового единства составляющих актов, можно включить ряд специальных признаков. К такого рода признакам следует отнести:

- длительность операции;
- степень повторяемости в процессе деятельности;
- законы распределения длительности и повторяемости;
- условия выполнения (очередность, взаимосвязанность и зависимость от разных факторов, важность, пр.);
- требования к точности и надежности выполнения и пр.

*Алгоритмическое описание деятельности диспетчера*

Деятельность диспетчера при управлении воздушным движением характерна весьма сложным набором внешних и внутренних условий его работы, состоянием воздушной обстановки, алгоритмами, процедурами, инструкциями, правилами и т.д. Все эти условия, свойства и факторы определяют процесс появления различного рода событий. Это могут быть вход в зону УВД воздушного судна, снятие координатных отметок ВС с ИВО, фиксация информации о воздушной обстановке на процедурных документах и т.д., то есть, деятельность

диспетчера можно представить как процесс реализации возможных воздействий между различными элементами системы УВД. Наиболее наглядно и просто это можно записать в виде блочных и логических схем алгоритмов (БСА, ЛСА). В блочной схеме алгоритма действия диспетчера обозначаются прямоугольниками, а логические условия – овалами (рис.4.1). Внутри каждого прямоугольника и овала записывается смысл данного члена алгоритма. Если проверяемое логическое условие выполняется, то управление осуществляется по стрелке с номером 1 (да). Если это условие не выполняется – по стрелке с номером 0 (нет). Достоинством этой формы моделирования является наглядность, содержательность, полнота, не противоречивость и законченность описания деятельности диспетчера.

В логической схеме алгоритма его элементы записываются в строчку в виде последовательности операторов и логических условий. Операторы обозначаются прописными буквами латинского алфавита, а логические – латинской буквой «Р». После каждого логического условия начальная нумерованная стрелка; конечная стрелка с таким же номером стоит перед определенным членом алгоритма. Работа алгоритма начинается с первого, левого члена схемы. Если это оператор, то действие переходит к следующему оператору, который непосредственно стоит за ним справа. Если же предыдущий член – логическое условие, то возможны два исхода: логическое условие выполняется – переход к следующему за ним оператору справа; логическое условие не выполняется – переход к тому оператору алгоритма, к которому ведет начальная нумерованная стрелка, стоящая после данного логического условия. Если необходимо, чтобы работа алгоритма не прекращалась после выполнения ряда операторов и логических условий, вводится «безусловное» логическое условие -  $\omega$ . Поскольку это условие всегда не выполняется, после него во всех случаях должен быть выполнен член алгоритма, указанный начальной нумерованной стрелкой, стоящей после ложного условия.

Опишем деятельность диспетчера при заходе воздушного судна на посадку по радиолокатору на этапе полета «точка входа в глиссаду (ТВГ) – ДПРМ». Введем следующие логические операторы:

- $P_7$  – проверка условия: «ВС отклоняется от линии глиссады (ЛГ)»?;
- $P_8$  – «ВС отклоняется выше или ниже глиссады?»;
- $P_9$  – «ВС отклоняется от линии курса?»;
- $P_{10}$  – проверка условия: « С момента предыдущей команды ВС пролетело два километра?».

Функциональные операторы:

- $A_6$  – команда экипажу о магнитном курсе полета и положении ВС относительно глиссады;
- $A_7$  – рассчитывается величина отклонения ВС относительно глиссады;
- $A_8$  – расчет магнитного курса полета ВС (см. рис. 4.1).

Логическая схема алгоритма имеет вид:

$$\downarrow_8 \downarrow_{11} A_6 \downarrow_{10} P_7 \uparrow^7 P_8 \uparrow^8 A_7 \downarrow_7 P_9 \uparrow^9 A_8 \downarrow_9 P_{10} \uparrow^{10} P_{11} \uparrow^{11}.$$

Логические схемы алгоритма позволяют вычислить нормированные показатели стереотипности и логической сложности деятельности диспетчера. Показатель стереотипности оценивается по наличию в алгоритме непрерывных последовательностей функциональных операторов без логических условий, а также по величине этих непрерывных последовательностей. Нормированный показатель стереотипности вычисляется следующим образом. Алгоритм разбивается на функциональные комплексные группы  $n_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ), где  $k$  – количество комплексных групп. С левого края алгоритма каждая комплексная группа начинается с

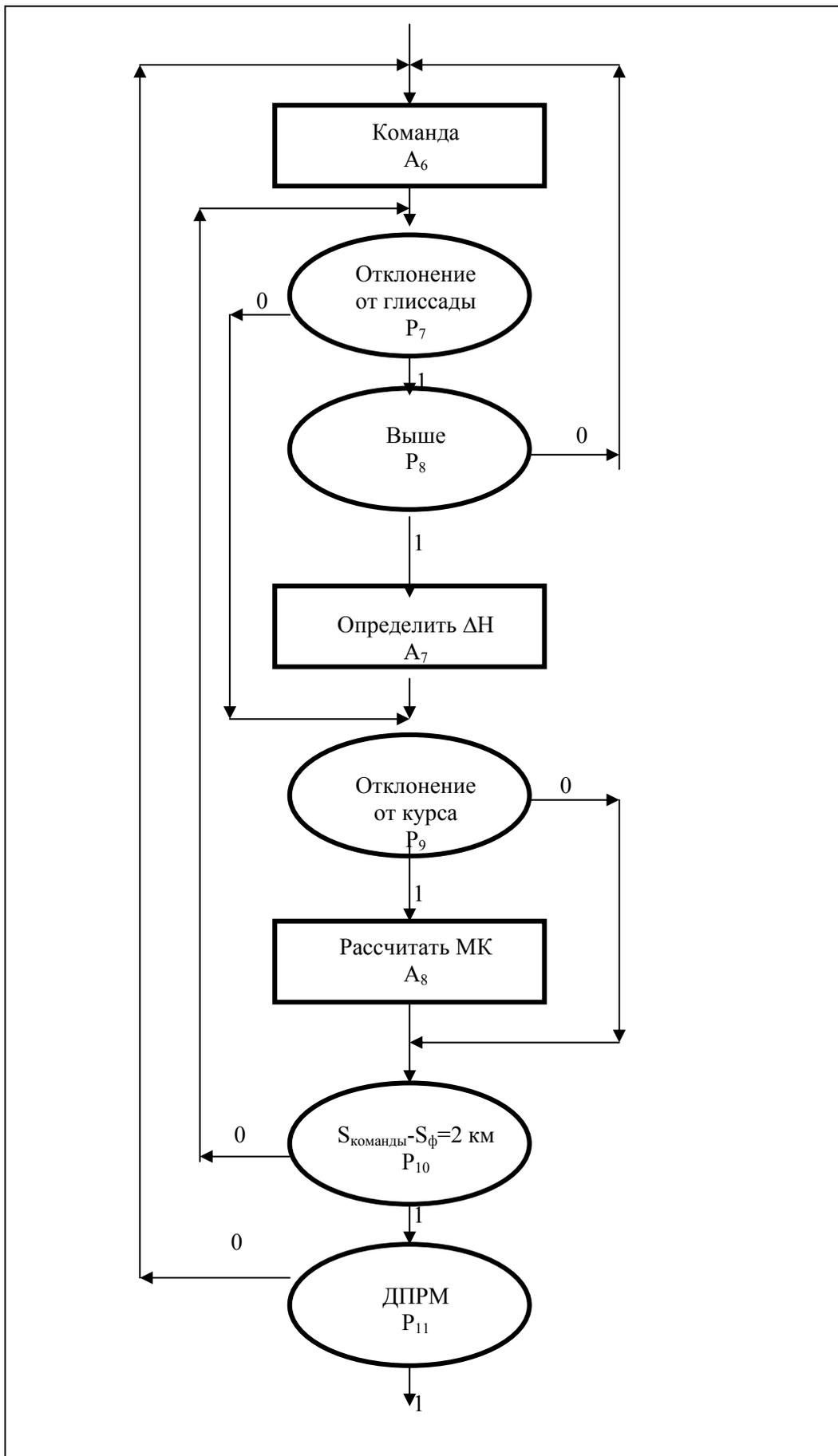


Рис. 4.1. Блочная схема алгоритма

функциональных операторов, включая в группу непрерывную ее последовательность. Справа к ней примыкают логические операторы, которые являются как бы разделяющими следующей комплексной группы. Таким образом, первая комплексная группа включает в себя непрерывную последовательность функциональных операторов и непрерывную группу логических операторов. Следующая комплексная группа снова начинается с функциональных операторов и т.д. Нормированный показатель стереотипности определяется по формуле:

$$z_{нс} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \frac{n_{io}^2}{n_i}, \quad (4.1)$$

где  $N$  – число операторов в алгоритме;  $n_{io}$  – количество непрерывной последовательности функциональных операторов;  $n_i$  – количество функциональных и логических операторов, входящих в  $i$ -ю комплексную группу.

Нормированный коэффициент логической сложности определяется по правилу:

$$L_{нл} = \frac{1}{N^*} \sum_{j=1}^r \frac{m_{jл}^2}{m_j}, \quad (4.2)$$

где  $N^*$  – число операторов в алгоритме, начиная с первой группы логических условий, так как предшествующая ей группа функциональных операторов не учитывается;  $m_{jл}$  – количество последовательных логических операторов в  $j$ -ой комплексной группе;  $m_j$  – количество операторов в  $j$ -ой комплексной группе, состоящей из  $m_{jл}$  последовательных логических операторов и примыкающей справа непрерывной последовательности функциональных операторов.

Принято считать, что если  $0,25 \leq z_{нс} \leq 0,85$  и  $L_{нл} \leq 0,2$ , то при реализации данного алгоритма достаточно полно учтены психофизиологические возможности человека.

*Пример.* Определить нормированные коэффициенты стереотипности и логической сложности диспетчера посадки на этапе полета ВС «ТВГ – ДПРМ» (см. рис. 4.1).

*Решение.* Логическая схема алгоритма имеет вид:  $A_6 P_7 P_8 A_7 P_9 A_8 P_{10} P_{11}$ .

1. Вычислим нормированный коэффициент стереотипности по формуле (4.1). Разобьем ЛСА на комплексные функциональные группы:

$$\overline{A_6 P_7 P_8} \quad \overline{A_7 P_9} \quad \overline{A_8 P_{10} P_{11}}.$$

Подсчитаем число элементов, входящих в комплексные группы:

$N = 8$ ;  $n_1 = 3$ ;  $n_{10} = 1$ ;  $n_2 = 2$ ;  $n_{20} = 1$ ;  $n_3 = 1$ .

$$z_{нс} = \frac{1}{8} \left( \frac{1^2}{3} + \frac{1^2}{2} + \frac{1^2}{3} \right) = \frac{7}{8 \cdot 6} = 0,15.$$

2. Нормированный коэффициент логической сложности находится по формуле (4.2).

Разобьем ЛСА на комплексные логические группы:  $\overline{P_7 P_8 A_7}$   $\overline{P_9 A_8}$   $\overline{P_{10} P_{11}}$ .

Число элементов, входящих в группы, составит величину:  $N^* = 7$ ;  $m_{1л} = 2$ ;  $m_1 = 3$ ;  $m_{2л} = 1$ ;  $m_2 = 2$ ;  $m_{3л} = 2$ ;  $m_3 = 3$ .

$$L_{нл} = \frac{1}{7} \left( \frac{2^2}{3} + \frac{1^2}{2} + \frac{2^2}{2} \right) = \frac{23}{7 \cdot 6} = 0,55.$$

### Структурная и функциональная надежность

*Алгоритм функционирования* – это совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению функций для достижения поставленной цели.

*Алгоритм управления* – совокупность предписаний, определяющих внешних воздействий на управляемый объект с целью выполнения им заданного алгоритма функционирования.

*Управление* – процесс осуществления воздействий, соответствующих алгоритму управления.

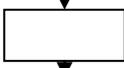
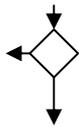
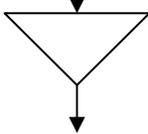
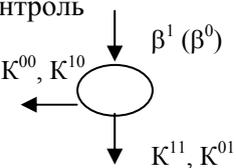
*Алгоритм* деятельности оператора – это совокупность предписаний, ведущих к достижению цели.

*Под структурой* деятельности оператора будем понимать формализованную математическую запись его деятельности или взаимодействия с техникой.

Описание функционирования системы представляет собой упорядоченную совокупность типовых единиц функционирования. К основным единицам функционирования относятся: рабочая (сенсорная, моторная), логическая (табл.1). В состав вспомогательных единиц функционирования функциональный и диагностический контроль.

Таблица 1

Основные формальные операции деятельности

Графическое изображение	Характеристики безошибочности		Характеристики бы- стродействия
	Название	Обозначение	Название
<p>Рабочая</p> 	<p>Вероятность безошибочного выполнения</p> <p>Вероятность ошибочного выполнения</p>	<p><math>\beta^1</math></p> <p><math>\beta^0</math></p>	<p>Математическое ожидание времени выполнения</p> <p>Дисперсия времени выполнения действия</p>
<p>Логическая</p> <p>Исход 1</p>  <p>Исход 2</p>	<p>Вероятность безошибочного выбора исхода 1 при факт. необходимости выбора</p> <p>Вер. ошибочного выбора исхода 2 при необходимости выбора исхода 1</p> <p>Вероятность безошибочного выбора исхода 2 при факт. необходимости выбора</p> <p>Вероятность ошибочного выбора исхода 1 при необходимости выбора исхода 2</p>	<p><math>\beta^{11}</math></p> <p><math>\beta^{12}</math></p> <p><math>\beta^{22}</math></p> <p><math>\beta^{21}</math></p>	<p>Математическое ожидание времени выполнения</p> <p>Дисперсия времени выполнения</p>
<p>Задержка</p> 	<p>Вероятность безошибочного перехода к задержке</p> <p>Вероятность ошибочного перехода к задержке</p>	<p><math>\beta^1</math></p> <p><math>\beta^0</math></p>	<p>Математическое ожидание времени выполнения</p> <p>Дисперсия времени выполнения</p>
<p>Функциональный Контроль</p> 	<p>Характеристики даны на с. 17</p>	<p><math>K^{11}</math></p> <p><math>K^{10}</math></p> <p><math>K^{00}</math></p> <p><math>K^{01}</math></p>	<p>Математическое ожидание времени выполнения</p> <p>Дисперсия времени выполнения</p>

## Функциональный контроль

$K^{11}$  – вероятность признания выполнения операции правильной при фактически правильной ее выполнения;  
 $K^{10}$  – Вероятность признания выполнения операции неправильной при фактически правильной ее выполнения;  
 $K^{00}$  – Вероятность признания выполнения Операции неправильной при фактически неправильной ее выполнения;  
 $K^{01}$  – Вероятность признания выполнения операции неправильной при фактически неправильной ее выполнения.

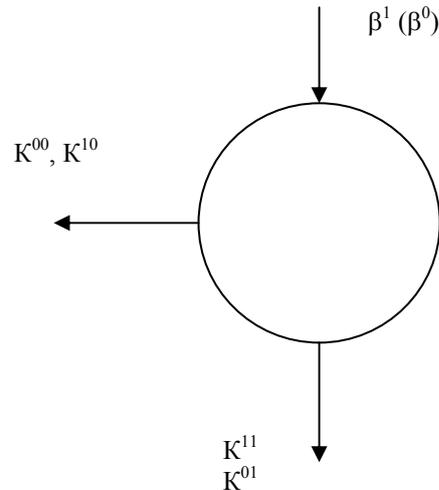


Рис. 4.2. Графическое изображение функционального контроля

*Расчет функциональной надежности*

Обобщенный структурный метод был разработан в конце 1971 г. С его помощью были решены многие практические задачи описания и оценки систем «человек – машина». Его использование давала возможность получать количественные показатели безошибочности и быстродействия, характеризующего функционально временное свойство системы «человек – машина» (СЧМ). Были введены типовые единицы функционирования СЧМ, с помощью которых строились выполнения программы, алгоритмов, задач, которые позволили формально представлять процесс выполнения системой предписанных ей функций (табл. 2).

В результате ошибок, допускаемых при выполнении, как основных операций, так и функционального контроля, могут иметь место следующие три основных исхода (рис. 4.3):

1. Переход к следующей технологической операции без повторения блока при отсутствии ошибок с вероятностью

$$A_0 = \beta^1 K^{11}.$$

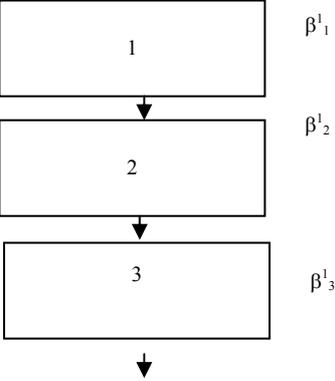
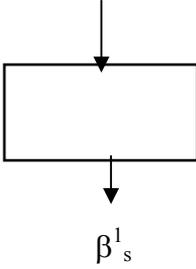
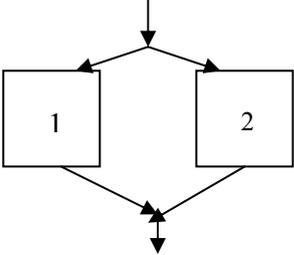
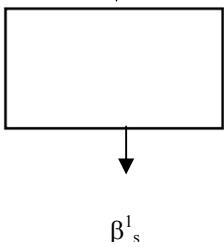
2. Переход к следующей технологической блоком без повторения предыдущего блока с вероятностью

$$C_0 = \beta^0 K^{01}.$$

3. Повторение основных технологических блоков и функционального контроля с вероятностью

$$B_0 = \beta^1 K^{10} + \beta^0 K^{00}.$$

Типовые блоки

Графическое изображение	Эквивалентная структура	Расчетные зависимости
<p>Блок последовательных рабочих операций</p> 		$\beta_s^1 = \prod_{i=1}^n \beta_i^1;$ $\beta_s^0 = 1 - \beta_s^1;$ $E(T) = \sum_{i=1}^n E(T_i);$ $D(T) = \sum_{i=1}^n D(T_i).$
<p>Параллельный блок</p> 		$\beta_s^1 = \beta_1^1 \cdot \beta_2^1;$ $\beta_s^0 = 1 - \beta_s^1;$ $T = \min[T_1, T_2];$ <p>или</p> $T = \max[T_1, T_2].$

Расчетные формулы представлены на рис.4.3 дерева вероятностей.

Обозначения:

$\beta^1$  – вероятность правильного выполнения операции;

$\beta^0$  – вероятность признания выполнения операции неправильной;

$K^{11}$  – вероятность признания правильного выполнения операции при фактически правильной ее выполнения;

$K^{10}$  – вероятность признания выполнения операции неправильной при фактически правильной ее выполнения;

$K^{00}$  – вероятность признания выполнения операции неправильной при фактически неправильной ее выполнения;  $K^{01}$  – вероятность признания выполнения операции правильной при фактически неправильной ее выполнении.

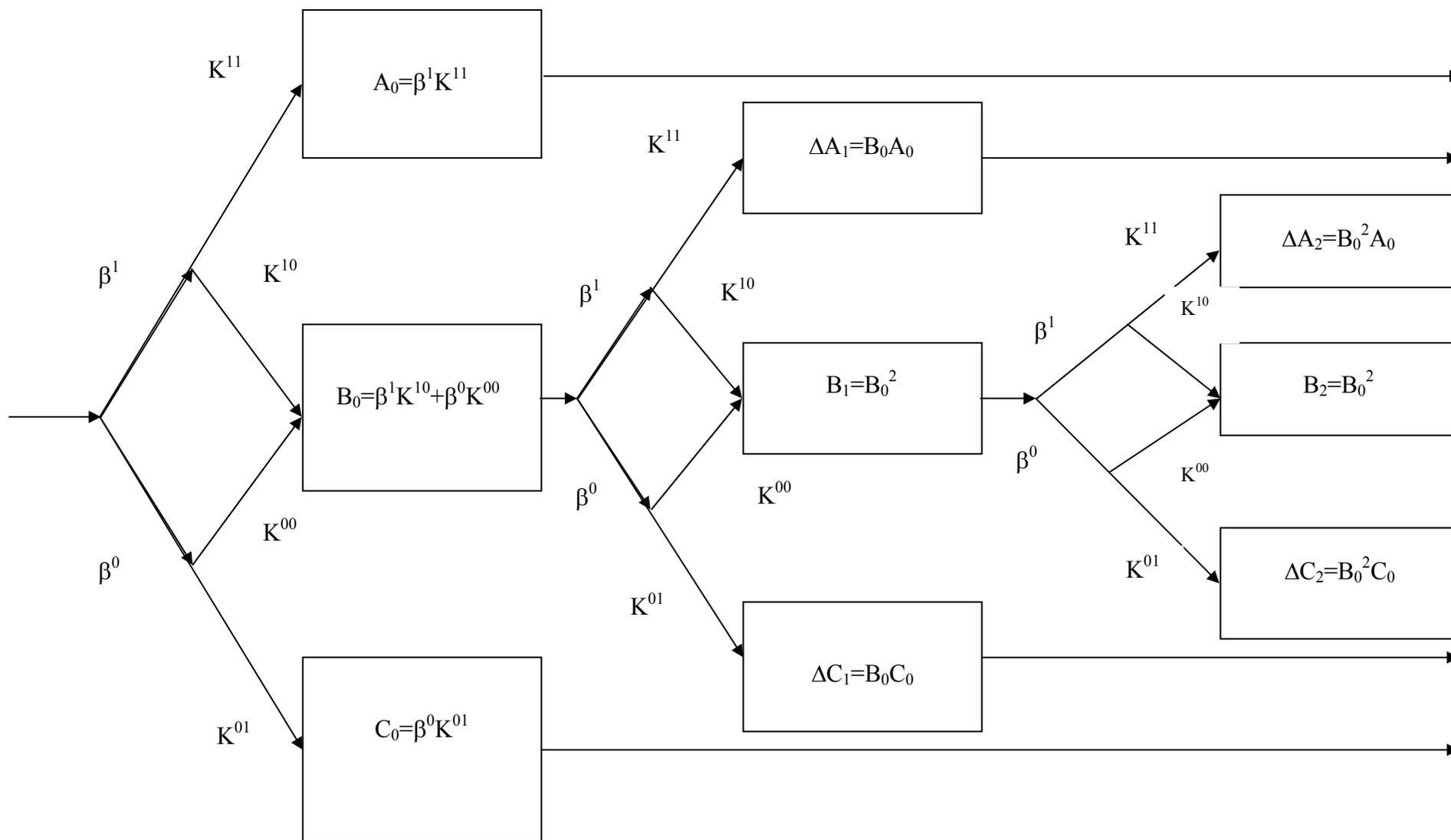


Рис. 4. 3. Дерево вероятностей и расчетные формулы

## Тема 5. Надежность системы УВД

Пространство состояний системы. Системные показатели надежности

Литература: [7].

Показатель надежности системы  $R_s(t)$  определим как вероятность того, что системе не угрожает никакая опасность до момента  $t$ , и это эквивалентно безотказной работе системы. Рассмотрим показатель ненадежности системы  $F_s(t)$ , который определяется как вероятность того, что системе угрожает опасность возникновения одного отказа до момента  $t$ .

### 5.1. Одноэлементная система

Рассмотрим одноэлементную систему с интенсивностью отказов  $\lambda$  и интенсивностью ремонтов  $\mu$ . На рис. 5.1 приведена Марковская диаграмма переходов.

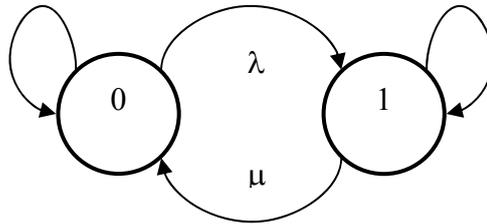


Рис. 5.1. Диаграмма переходов для одноэлементной системы

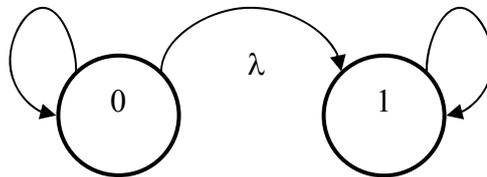


Рис. 5.2. Диаграмма переходов для расчета показателей надежности

Стрелка от состояния 1 к состоянию 0 означает завершение ремонта системы. Однако при оценке надежности рассматривается только временной интервал, начинающийся в момент первого отказа системы. Таким образом, можно не учитывать стрелку перехода от 1 до 0 на рис. 5.1 и получить рис. 5.2, где состояние 1 является поглощающим, так как у него имеется только вход со стороны состояния 0 и нет выхода к состоянию 0.

Дифференциальное уравнение, описывающее вероятность  $P_0(t)$  состояние элемента, имеет вид

$$\dot{P}_0 = -\lambda P_0; \quad P_0(0) = 1. \quad (5.1)$$

Оно имеет решение

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (5.2)$$

$P_0(t)$  есть вероятность того, что система продолжает функционировать до момента  $t$ , поскольку нет перехода от состояния 1 к состоянию 0. Таким образом, показатель надежности системы

$$R_s(t) = P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (5.3)$$

Показатель ненадежности системы равен единице минус ее показатель надежности:

$$F_s(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (5.4)$$

С другой стороны, вероятность  $P_1(t)$  состояния системы описывается выражением

$$\dot{P}_1 = \lambda P_0 \quad (5.5)$$

или

$$P_1(t) = \int_0^t \lambda P_0(u) du,$$

где  $P_1(t)$  – вероятность отказа системы до момента  $t$ , так как диаграмма, представленная на рис. 6.2, не имеет перехода из состояния 1. Следовательно, показатель ненадежности системы  $F_s(t)$  совпадает с  $P_1(t)$  и определяется по формуле

$$F_s(t) = P_1(t) = \int_0^t \lambda P_0(u) du = \int_0^t \lambda e^{-\lambda u} du = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5.6)$$

что подтверждает справедливость формулы (5.4). Видно, что с увеличением  $t$  показатель ненадежности приближается к единице. Другими словами, отказ в системе возникает через достаточно большой интервал времени.

### 5.2. Двухэлементная система последовательного типа

Рассмотрим систему последовательного типа, состоящую из элементов из 1 и 2. Соответствующая Марковская диаграмма переходов представлена на рис. 5.3. В системе возникает отказ, когда она переходит в состояние (1,0) или (0,1). Поскольку рассматривается процесс, заканчивающийся первым отказом системы, то диаграмму можно упростить и получить рис 5.4. На этой упрощенной диаграмме узлы (1,0) и (0, 1) являются поглощающимися состояниями.

Дифференциальное уравнение для определения вероятности  $P_0(t)$  состояния системы имеет вид

$$\dot{P}_0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0, \quad P_0(0) = 1; \quad (5.7)$$

его решение таково:

$$P_0(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}. \quad (5.8)$$

Видно, что показатель надежности системы есть произведение показателей надежности обоих элементов  $e^{-\lambda_1 t}$  и  $e^{-\lambda_2 t}$ . Это свойство обычно сохраняется для систем последовательного типа, состоящих из  $n$  элементов. Показатель ненадежности системы:

$$F_s(t) = 1 - R_s(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}. \quad (5.9)$$

Другой путь уравнения (5.10) – использование дифференциальных уравнений для вероятностей  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  состояний:

$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_1(t) &= \lambda_1 P_0(t); \\ \dot{P}_2(t) &= \lambda_2 P_0(t). \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

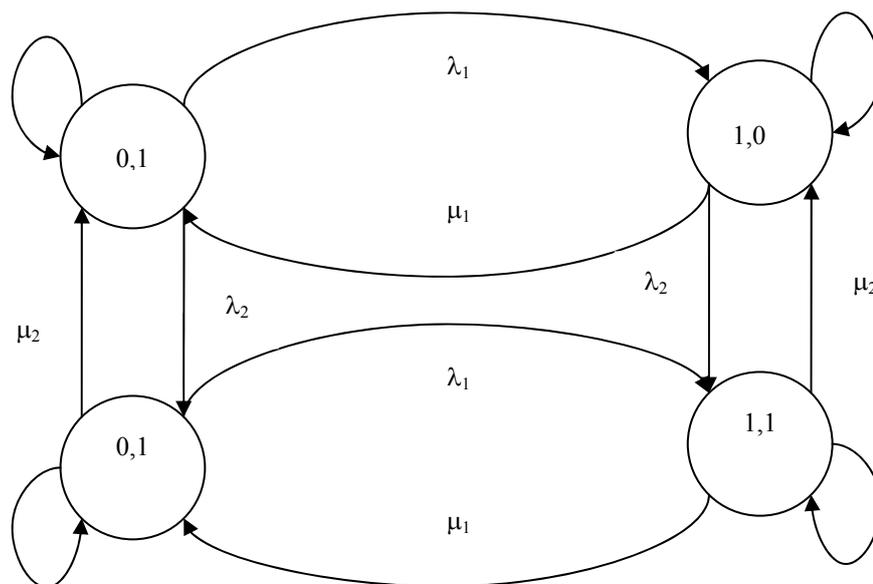


Рис. 5.3. Диаграмма переходов для двухэлементной системы

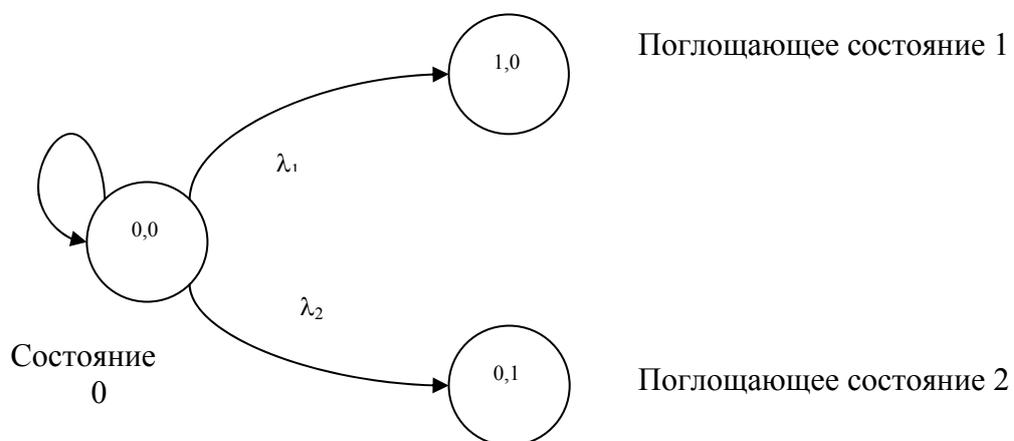


Рис. 5.4. Диаграмма переходов для расчета показателя надежности двухэлементной системы последовательного типа

Уравнение имеет решение:

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= \int_0^t \lambda_1 P_0(u) du = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}); \\ P_2(t) &= \int_0^t \lambda_2 P_0(u) du = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}). \end{aligned} \right\}$$

Величина  $P_1(t)$  есть вероятность того, что в системе возникает отказ к моменту  $t$  из-за отказа первого элемента. Аналогичным образом  $P_2(t)$  есть вклад в показатель надежности системы из-за отказа второго элемента. Показатель ненадежности системы получаем как сумму вероятностей  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  состояний:

$$F_s(t) = P_1(t) + P_2(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t},$$

что подтверждает справедливость уравнения (5.10). Следует заметить, что  $F_s(t)$  есть сумма вероятностей обоих поглощающих состояний (1 и 2). В целом показатель ненадежности системы есть сумма вероятностей всех поглощающих состояний.

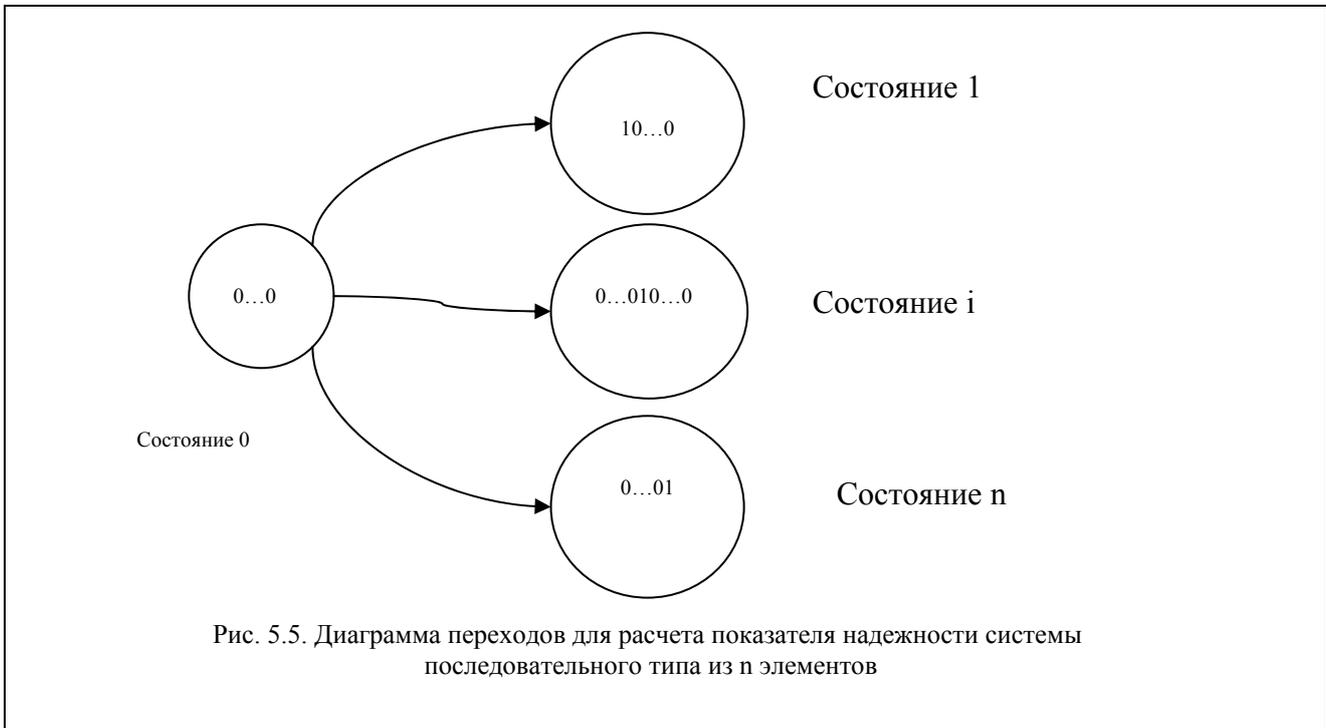
### 5.3. Система из $n$ элементов последовательного типа

Системы последовательного типа, состоящие из  $n$  элементов, можно описать диаграммой переходов, представленной на рис. 5.5, которая является расширенным вариантом диаграммы, показанной на рис. 5.4. Полученное в результате дифференциальное уравнение для состояния 0 примет вид:

$$\dot{P}_0 = -(\lambda_1 + \dots + \lambda_n)P_0, \quad P_0(0) = 1. \quad (5.11)$$

Показатель ненадежности системы

$$R_s(t) = e^{-(\lambda_1 + \dots + \lambda_n)t}. \quad (5.12)$$



Видно, что показатель надежности системы последовательного типа есть произведение показателей надежности ее элементов типа  $i=1, \dots, n$ . Показатель ненадежности системы

$$F_s(t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \dots + \lambda_n)t}. \quad (5.13)$$

Таким образом, показатель ненадежности равен сумме вероятностей поглощающих состояний 1, ...,  $n$ .

### 5.4. Система параллельного типа

Двухэлементные системы параллельного типа можно описать диаграммой переходов, представленной на рис. 5.3. Поскольку рассматривается интервал времени, заканчивающийся первым отказом системы, то переходы из состояния (1, 1) можно исключить; тогда рис. 5.3 сводится к рис. 5.6. Полученные в результате дифференциальные уравнения имеют вид:

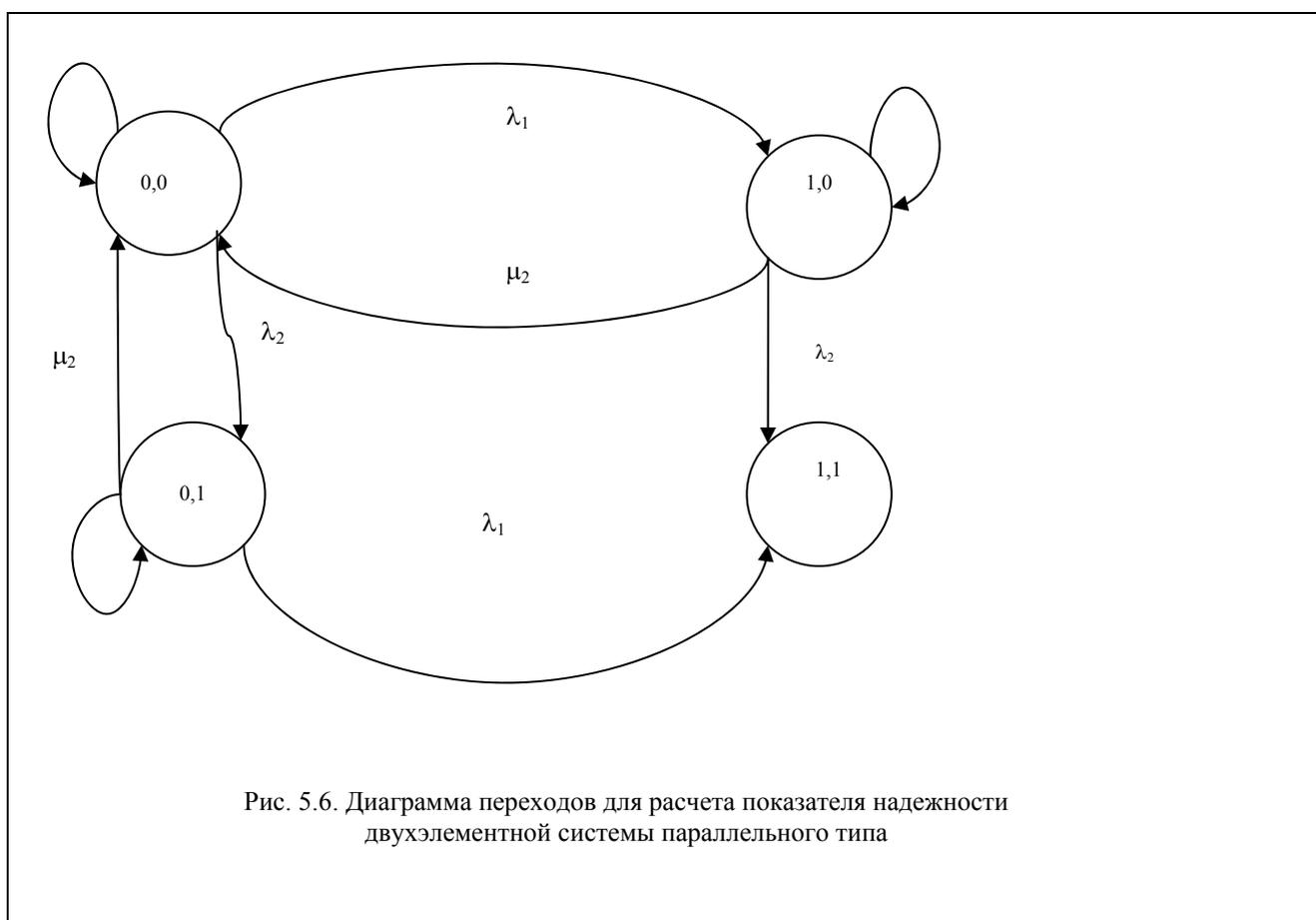
$$\left. \begin{aligned} \dot{P}_{0,0} &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_{0,0} + \mu_1 P_{1,0} + \mu_2 P_{0,1}; \\ \dot{P}_{1,0} &= \lambda_1 P_{0,0} - (\mu_1 + \lambda_2)P_{1,0}; \\ \dot{P}_{0,1} &= \lambda_2 P_{0,0} - (\mu_2 + \lambda_2)P_{0,1}; \\ \dot{P}_{1,1} &= \lambda_2 P_{1,0} + \lambda_1 P_{0,1} \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

с начальными условиями

$$P_{0,0}(0) = 1; \quad P_{1,0}(0) = P_{0,1}(0) = P_{1,1}(0) = 0. \quad (5.15)$$

Следует заметить, что первые три уравнения (5.14) можно решать независимо от последнего уравнения. Система функционирует до тех пор, пока она находится в состоянии (0, 0), (1, 0) или (0,1). Таким образом, показатель надежности системы  $R_s(t)$  определяется суммой

$$R_s(t) = P_{0,0}(t) + P_{1,0}(t) + P_{0,1}(t). \quad (5.16)$$



Показатель ненадежности системы  $F_s(t)$  есть

$$F_s(t) = 1 - P_{0,0}(t) - P_{1,0}(t) - P_{0,1}(t). \quad (5.17)$$

Он совпадает с  $P_{1,1}(t)$ , т.е. с вероятностью поглощающего состояния (1,1), поскольку сумма вероятностей всех состояний равна единице:

$$F_s(t) = P_{1,1}(t). \quad (5.18)$$

**Пример 1.** Определить параметры надежности системы параллельного типа. Примем следующие интенсивности отказов и ремонтов ( $\text{ч}^{-1}$ ) для элементов 1 и 2, которые соответственно равны ( $\lambda_1=10^{-3}$ ,  $\mu_1=10^{-1}$ ) и ( $\lambda_2=2 \cdot 10^{-3}$ ,  $\mu_2=2,5 \cdot 10^{-2}$ ). Вычислить  $R_s(t)$  и  $F_s(t)$  при значениях

t, равных 100, 500 и 1000 часов. Задача решается в среде MathCAD, поэтому в описании сохраняется его стилистика.

Решение. Первые три уравнения (5.14) принимают вид

$$\dot{P}_{0,0} = -0,003P_{0,0} + 0,1P_{1,0} + 0,025P_{0,1};$$

$$\dot{P}_{1,0} = 0,001P_{0,0} - 0,102P_{1,0};$$

$$\dot{P}_{0,1} = 0,002P_{0,0} - 0,025P_{0,1}.$$

$$\lambda_1 := 10^{-3} \quad \mu_1 := 10^{-1} \quad \lambda_2 := 2 \cdot 10^{-3} \quad \mu_2 := 2.5 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{d}{dt}x_0 = -(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot x_0 + \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 \quad \frac{d}{dt}x_1 = \lambda_1 \cdot x_0 - (\mu_1 + \lambda_2) \cdot x_1$$

$$\frac{d}{dt}x_2 = \lambda_2 \cdot x_0 - (\mu_2 + \lambda_2) \cdot x_2 \quad \frac{d}{dt}x_3 = \lambda_2 \cdot x_1 + \lambda_1 \cdot x_2$$

Дифференциальные уравнения решим с помощью MathCAD.

$$x_0 := 1 \quad x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0 \quad \lambda_1 := 10^{-3} \quad \mu_1 := 10^{-1} \quad \lambda_2 := 2 \cdot 10^{-3} \quad \mu_2 := 2.5 \cdot 10^{-2}$$

$$x := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D(t, x) := \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot x_0 + \mu_1 \cdot x_1 + \mu_2 \cdot x_2 \\ \lambda_1 \cdot x_0 - (\mu_1 + \lambda_2) \cdot x_1 \\ \lambda_2 \cdot x_0 - (\mu_2 + \lambda_2) \cdot x_2 \\ \lambda_2 \cdot x_1 + \lambda_1 \cdot x_2 \end{bmatrix} \quad z := \text{rkfixed}(x, 0, 500, 50, D)$$

$$i := 1..3$$

Таблица 3

	0	1	2	3	4
0	0	1	0	0	0
1	10	0.976	6.094 · 10 <sup>-3</sup>	0.017	1.649 · 10 <sup>-4</sup>
2	20	0.961	8.228 · 10 <sup>-3</sup>	0.03	5.533 · 10 <sup>-4</sup>
3	30	0.95	8.936 · 10 <sup>-3</sup>	0.04	1.079 · 10 <sup>-3</sup>
4	40	0.941	9.139 · 10 <sup>-3</sup>	0.047	1.695 · 10 <sup>-3</sup>
5	50	0.935	9.169 · 10 <sup>-3</sup>	0.052	2.375 · 10 <sup>-3</sup>
6	60	0.929	9.145 · 10 <sup>-3</sup>	0.056	3.102 · 10 <sup>-3</sup>
7	70	0.925	9.107 · 10 <sup>-3</sup>	0.059	3.862 · 10 <sup>-3</sup>
8	80	0.922	9.07 · 10 <sup>-3</sup>	0.061	4.647 · 10 <sup>-3</sup>
9	90	0.919	9.037 · 10 <sup>-3</sup>	0.063	5.45 · 10 <sup>-3</sup>
10	100	0.916	9.007 · 10 <sup>-3</sup>	0.064	6.266 · 10 <sup>-3</sup>
11	110	0.914	8.981 · 10 <sup>-3</sup>	0.065	7.092 · 10 <sup>-3</sup>
12	120	0.912	8.959 · 10 <sup>-3</sup>	0.066	7.924 · 10 <sup>-3</sup>
13	130	0.91	8.938 · 10 <sup>-3</sup>	0.066	8.762 · 10 <sup>-3</sup>
14	140	0.908	8.919 · 10 <sup>-3</sup>	0.066	9.602 · 10 <sup>-3</sup>
15	150	0.906	8.901 · 10 <sup>-3</sup>	0.067	0.01

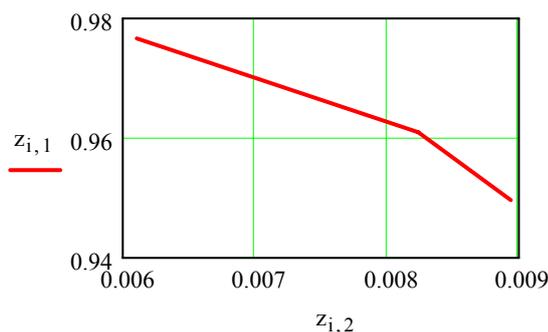


Рис.5.7. Зависимость надежности от t

## 7. Контрольные задания

Студент должен решить первую задачу того варианта, номер которого соответствует последней цифре учебного шифра студента (табл. 4) и вторую задачу, номер которой соответствует двум последним цифрам учебного шифра (табл. 5).

При выполнении контрольной работы необходимо переписать условие задачи, а затем последовательно описать развернутое решение.

**Задача 1.** Построить блочную и логическую схему алгоритма деятельности диспетчера. Рассчитать нормированные коэффициенты стереотипности и логической сложности.

Литература: [3, с. 72-85].

Таблица 4

### Варианты заданий

Вариант	Условие задачи
1	Решение диспетчера на занятие ВС исполнительного старта
2	Решение диспетчера на взлет ВС
3	Формирование интервала в точке третьего разворота
4	УВД по РЛК на этапе «четвертый разворот – ТВГ»
5	УВД по ПРЛ на этапе «ТВГ – ДПРМ»
6	УВД по ПРЛ на этапе «ДПРМ - БПРМ»
7	УВД при пересечении встречного занятого эшелона
8	УВД при пересечении попутного занятого эшелона
9	Решение диспетчера при запрещении ЭВС на взлет
0	УВД при пересечении занятого эшелона

**Задача 2.** Определить характеристику радиоканала между диспетчером и экипажами ВС, если на диспетчерский пункт поступает пуассоновский поток требований с параметром  $\lambda$ . Длительность радиообмена описывается показательным распределением с параметром  $\mu$ . Построить размеченный граф и найти финальные вероятности и количественные характеристики канала радиосвязи ( $A$  – абсолютную пропускную способность радиоканала;  $Q$  – относительную пропускную способность радиоканала;  $P_{\text{отк}}$  – вероятность отказа (не своевременная связь, установление связи с задержкой;  $L_q$  – среднее число требований в очереди;  $\bar{c}$  – средняя загруженность радиоканала;  $\bar{n}$  – среднее число требований в очереди;  $w_q$  – среднее время ожидания радиообмена).

Литература: [3, с. 90-92].

В табл. 5 (варианты заданий) приняты следующие обозначения: выз – вызовы; рсв – радиосвязи.

## Варианты заданий

Вариант	$\lambda$ выз/30 мин	$\mu$ рсв/30 мин	Вариант	$\lambda$ выз/30 мин	$\mu$ рсв/30 мин
1	5	60	51	5	45
2	10	60	52	10	45
3	15	60	53	15	45
4	20	60	54	20	45
5	25	60	55	25	45
6	30	60	56	30	45
7	35	60	57	35	45
8	40	60	58	40	45
9	45	60	59	45	50
10	50	60	60	50	55
11	55	60	61	55	65
12	5	40	62	5	58
13	10	40	63	10	58
14	15	40	64	15	58
15	20	40	65	20	58
16	25	40	66	25	58
17	30	40	67	30	58
18	35	40	68	35	58
19	27	40	69	27	58
20	29	40	70	29	58
21	31	40	71	31	58
22	33	40	72	33	68
23	5	50	73	5	68
24	10	50	74	10	68
25	15	50	75	15	68
26	20	50	76	20	68
27	25	50	77	25	68
28	30	50	78	30	68
29	35	50	79	35	68
30	40	50	80	40	68
31	45	50	81	45	68
32	38	50	82	38	52
33	42	50	83	42	52
34	5	55	84	5	52
35	10	55	85	10	52
36	15	55	86	15	52
37	20	55	87	20	52
38	25	55	88	25	52
39	30	55	89	30	52
40	35	55	90	35	52
41	40	55	91	40	52
42	45	55	92	45	59
43	50	55	93	50	59
44	53	55	94	53	59
45	15	38	95	15	42
46	25	38	96	25	42
47	35	38	97	35	42
48	45	38	98	45	51
49	20	38	99	20	51
50	30	38	00	30	51

Технический редактор Т.Н. Заграничная  
Подписано к печати 21.04.2004. Формат бумаги 69×90 1/16  
Тираж 200. Заказ 421. С42. Уч.-изд. л. 1,75. Усл. печ. л. 1,75.  
Тип. Академия ГА. 196210. С.-Петербург, ул. Пилотов, дом 38.