Министерство образования и науки России

Севастопольский государственный университет

Практикум

НАДЁЖНОСТЬ СРЕДСТВ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к расчётно-графическому занятию по дисциплине «Надёжность средств техносферной безопасности»

для студентов профиля «Инженерная защита окружающей среды»

дневной и заочной форм **обучения**

Севастополь

2016

УДК. 681+628

Методические указания к расчётно-графическому занятию «Расчёт надёжности средств техносферной безопасности» по дисциплине «Надёжность средств техносферной безопасности» для студентов профиля «Инженерная защита окружающей среды» дневной и заочной форм обучения / СГУ; составил В. В. Севриков. – Севастополь: Изд-во СГУ, 2016.- С.

Цель методических указаний – закрепление и углубление теоретических знаний у студентов профиля «Инженерная защита окружающей среды» дневной и заочной форм обучения СГУ.

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры ТБ, протокол №26 от «25»__12__2015г.

Допущено учебно-методическим центром и НТС СГУ

Рецензент: кандидат технических наук, профессор Харченко А. О.

Разработал: Севриков В. В., профессор кафедры ТБ.

Ответственный за выпуск: Ничкова Л.А., доцент, кандидат технических наук, зав. кафедрой ТБ.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1

НАДЁЖНОСТЬ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СРЕДСТВ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Цель – ознакомить студентов с инженерными методами расчёта безотказности невосстанавливаемых систем, в том числе средств экологической безопасности.

В результате выполнения практической работы студент должен уметь самостоятельно проводить анализ и расчёт надёжности технических объектов, восстановление которых не предусмотрено.

1.1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

1.1.1 Понятие о расчёте надёжности

В соответствии с межгосударственным стандартом [1] **под расчётом надёжности** понимается процедура определения значений показателей надёжности (ПН) объекта, с использованием методов, основанных на их вычислении по опытным справочным данным о надёжности элементов объекта, по данным о надёжности объектов-аналогов, данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчёта.

Прогнозирование надёжности – частный случай расчёта надёжности объекта на основе статистических моделей, отражающих тенденции изменения надёжности объектов-аналогов и (или) экспертных оценок.

Расчёт надёжности (РН) может проводиться на одной из стадий жизненного цикла изделия проектировании, изготовлении, эксплуатации. Основной целью РН может быть:

- обоснование количественных требований по надёжности к объекту или его составным частям;

- сравнительный анализ надёжности вариантов схемно-конструктивного построения объекта и обоснование выбора рационального варианта;

- определение достигнутого (ожидаемого) уровня надёжности объекта и (или) его составных частей;

- обоснование и проверка эффективности предлагаемых (реализованных) мер, направленных, например, на повышение безотказности объекта и так далее.

По составу рассчитываемых показателей надёжности различают следующие методы РН по составляющим (свойствам) изделия:

- безотказности;

- ремонтопригодности;

- долговечности;

- сохраняемости;

- комплексных показателей надёжности.

По основным принципам расчёта свойств (составляющих надёжности) различают:

- методы прогнозирования;

- структурные методы расчёта;

- физические методы расчёта.

Методы прогнозирования основаны на использовании для оценки ожидаемого уровня надёжности объекта данных о достигнутых значениях (и выявленных тенденциях изменения) показателей надёжности объектов, аналогичных или близких к рассматриваемому изделию по назначению, принципам действия, схемно-конструктивному построению, элементной базе, условиям и режимам эксплуатации и так далее.

Структурные методы расчёта основаны на представлении объекта в виде логической (структурно-функциональной) схемы, описывающей зависимость состояния и переходов изделия от состояния и переходов его элементов с учётом их взаимодействия и выполняемых ими функций. При этом вычисление показателей надёжности (ПН) объекта производится по известным характеристикам надёжности его элементов.

Физические методы расчёта основаны на применении математических моделей, описывающих физические, химические и иные процессы, приводящие к отказам технических объектов (к переходу в предельное состояние). Вычисление ПН производится по известным параметрам, например, нагруженности изделия или характеристикам применяемых в нём материалов и веществ.

Структурные методы являются основными методами расчёта показателей безотказности, ремонтопригодности и комплексных ПН в процессе проектирования объектов, поддающихся разукрупнению на элементы, характеристики надёжности которых, в момент проведения расчётов известны. Эти методы применяются также для расчёта долговечности и сохраняемости изделий, критерии предельного состояния которых, могут быть выражены через параметры долговечности (сохраняемости) входящих в изделие элементов.

При оценках надёжности средств техносферной безопасности наибольшее практическое применение нашли структурные методы расчёта ПН. Поэтому, далее будут рассмотрены именно эти методы.

РН структурными методами в общем случае включает:

- представление объекта в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и объектов в целом с учётом структурно-функциональных связей и взаимодействия элементов, принятой стратегии обслуживания, видов и способов резервирования и других факторов;

- описание построенной структурной схемы надёжности (ССН) объекта адекватной математической моделью позволяющей в рамках введенных предложений и допущений вычислить ПН объекта по данным о надёжности его элементов в рассматриваемых условиях их применения.

В качестве ССН могут применяться:

- структурные блок схемы надёжности, представляющие объект в виде совокупности определённым образом соединённых (в смысле надёжности) элементов;

- «деревья» отказов объекта, представляющие графическое отображение причинно-следственных связей, обуславливающих определённые виды его отказов;

- графы (диаграммы) состояний и переходов, описывающие возможные состояния объекта и его переходы из одного состояния в другое в виде совокупности состояний и переходов его элементов.

В литературе иногда встречается понятие «определение надёжности», под которым понимают определение численных значений показателей надёжности объекта.

1.1.2 Уточнение понятий «невосстанавливаемый» и «восстанавливаемый» объект

Невосстанавливаемым называется объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Другими словами, под невосстанавливаемым объектом понимается такой объект, работа которого после отказа считается полностью невозможной и нецелесообразной. Типичными примерами таких объектов являются электрические лампочки накаливания, полупроводниковые приборы, метеорологические ракеты и т. д.

Однако к невосстанавливаемым объектам можно отнести не только те, которые принципиально не могут ремонтироваться. Само понятие «невосстанавливаемый объект» в первую очередь характеризуется не видом данного оборудования, а его специфическим назначением.

В основном под невосстанавливаемыми объектами на практике специалисты по надёжности понимают такие объекты, отказ которых в процессе функционирования может приводить к непоправимым последствиям, иначе говоря, восстановление которых не приводит к ликвидации последствий отказа. В этом смысле, например, **технические средства защиты на производстве (СЗП) или средства экологической безопасности (СЭБ), для которых перерывы в работе могут привести к аварийным ситуациям, травмам, загрязнению окружающей природной среды и т.д., необходимо рассматривать как невосстанавливаемые системы.** В тоже время ясно, что большое количество этих средств после появления отказа ремонтируются и становятся вновь годными для дальнейшего использования. Такие средства (объекты, системы, изделия) являются **восстанавливаемыми.**

1.1.3 Показатели надёжности невосстанавливаемых объектов

Для технических средств, обеспечивающих безопасность, в частности СЭБ важнейшим является свойство безотказности. В соответствии со стандартом [2] **безотказность** – это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Рассмотрим основные показатели надёжности невосстанавливаемых объектов по свойству безотказности при произвольном законе распределения наработки до отказа.

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Эта вероятность определяется в предположении, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) объект находился в работоспособном состоянии. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале времени от 0 до t включительно определяют из выражения

$$P(t) = P\{T_1 \succ t\}, \tag{1}$$

где T_1 - наработка объекта до первого отказа, ч:

t - время работы объекта, ч.

Статистически вероятность безотказной работы (точечная статистическая оценка по результатам испытаний) рассчитывают по формуле

$$P^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \tag{2}$$

где $n(t)$ - число объектов, отказавших на отрезке времени от 0 до t;

N_0 - число объектов, работоспособных в начальный момент времени (в начале испытаний).

Вероятность отказа – это вероятность того, что объект откажет хоть один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным, в начальный момент времени. Вероятность отказа $Q(t)$ на отрезке от 0 до t определяется по формуле

$$Q(t) = F(t) = 1 - P(t), \tag{3}$$

где $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа;

$P(t)$ - вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до t.

Статистически эта вероятность оценивается из выражения

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \tag{4}$$

где $n(t)$ и N_0 - то же, что в формуле (2).

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Среднюю наработку до отказа T_1 вычисляют из выражения

$$T_1 = \int_0^\infty [1 - F(t)]dt = \int_0^\infty P(t)dt, \qquad (5)$$

где $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа;

$P(t)$ - вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до t.

Статистическая оценка для средней наработки до отказа может быть дана по формуле

$$T^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \qquad (6)$$

где t_i - наработка до первого отказа каждого из объектов, ч;

N_0 - число объектов, работоспособных в начальный момент времени (в начале испытаний).

Интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$, 1/ч, определяется из выражения

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}, \qquad (7)$$

где $f(t)$ - плотность вероятности распределения наработки до отказа;

$F(t)$ и $P(t)$ - то же, что в формулах (3) и (5).

Статистическая оценка для интенсивности отказов $\lambda(t)$, 1/ч, имеет вид

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{ср} \cdot \Delta t}, \qquad (8)$$

где $n(\Delta t)$ - число объектов, отказавших в интервале времени Δt;

$N_{ср}$ - среднее число объектов, которые остаются в работоспособном состоянии в интервале времени Δt.

Среднее число объектов, сохраняющих работоспособное состояние в интервале времени Δt, определяют по формуле

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \tag{9}$$

где N_i - число изделий, безотказно работающих в начале интервала времени Δt;

N_{i+1} - число изделий, безотказно работающих в конце интервала времени Δt.

При расчётах надёжности, наряду с интенсивностью отказов, иногда используют показатель «частота отказов».

Частота отказов $a(t)$ - это плотность вероятности времени работы изделия до первого отказа, которую определяют из выражения

$$a(t) = -P'(t) = Q'(t) = F'(t) = f(t) = P(t) \cdot \lambda(t), \tag{10}$$

где $P(t)$, $F(t)$, $f(t)$ - то же, что и в формуле (7).

Из равенства (10) следует, что:

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt, \tag{11}$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt, \tag{12}$$

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \tag{13}$$

Статистическая оценка для частоты отказов $a(t)$, 1/ч, имеет вид

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \tag{14}$$

где $n(\Delta t)$ и Δt - то же, что и в выражении (8);

N_0 - число объектов, работоспособных в начальный момент времени (количество изделий, поставленных на испытания).

Необходимо заметить, что при получении статистических оценок показателей надёжности, приведённых в подразделе 1.3. использована следующая модель (схема) испытаний. На испытания поставлены N_0 работоспособных объектов (изделий). Испытания считаются законченными, если все изделия отказали. Причём вместо отказавших образцов, отремонтированные или новые изделия не ставятся.

1.2 СТРУКТУРНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ РАССЧЁТНЫЕ СХЕМЫ И МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ

1.2.1 Виды соединения элементов при расчётах надёжности

Соединение элементов с точки зрения теории надёжности, как правило, не соответствует их физической схеме соединения (электрической, гидравлической и т. д.), ибо оно осуществляется, прежде всего, с учётом влияния функционирования каждого элемента на надёжность всей системы. Различаются следующие виды соединения элементов: последовательное, параллельное, смешанное и сложное.

Параллельное соединение элементов часто применяют как вариант структурного резервирования, с целью повышения надёжности системы или достижения требуемого уровня её безотказности.

В дальнейшем, если особо не оговаривается обратное, отказы элементов в системах предполагаются независимыми, то есть отказ любого элемента (группы элементов) никак не влияет на вероятностные характеристики остальных элементов.

1.2.2 Расчёт надёжности невосстанавливаемых систем при последовательном соединении элементов

Последовательным соединением при расчётах надёжности называется такое соединение элементов, при котором отказ хотя бы одного из них приводит к отказу всего соединения (системы) в целом.

На рисунке 1 показана структурная схема последовательного соединения элементов.

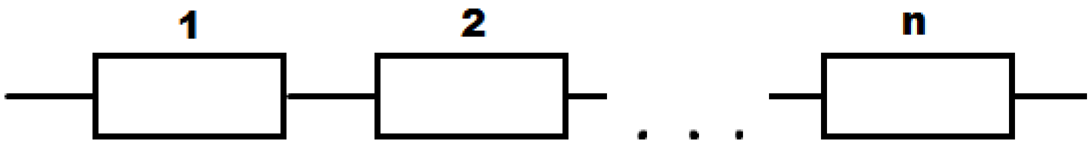

Рисунок 1 – Структурная схема системы с последовательным соединением элементов

При произвольном законе распределения наработки до отказа отдельных элементов, вероятность безотказной работы

$$P_c(t) = p_1(t) \cdot p_2(t) \cdot \ldots \cdot p_n(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t), \qquad (15)$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го элемента;

n - общее количество последовательно включённых элементов.

Вероятность отказа системы $Q_c(t)$ с последовательно соединёнными элементами определяют из выражения

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_i(t). \qquad (16)$$

В формуле (16) использованы те же обозначения, что и в равенстве (15).

1.2.3 Расчёт надёжности невосстанавливаемых систем при параллельном соединении элементов

Параллельным соединением при расчётах надёжности называется такое соединение элементов, при котором отказ системы (рисунок 2) происходит только при отказе всех её элементов.

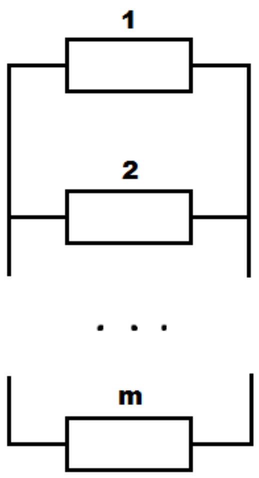

Рисунок 2 – Структурная схема системы при параллельном соединении m элементов

Параллельное соединение элементов используется, прежде всего, как способ повышения надёжности различных технических систем (электрических, механических и т. д.). В этом случае, используют термин «резервирование».

Резервирование – способ обеспечения надёжности объекта за счёт использования дополнительных средств и (или) возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Под «резервом» понимают совокупность дополнительных средств и (или) возможностей, используемых для резервирования. Таким образом, при резервировании создаётся дополнительная избыточность в системе. Если для создания избыточности предусматривается использование дополнительных элементов в структуре объекта (введения узлов, блоков и элементов, аналогичных имеющимся), то такое резервирование называется структурным.

При резервировании различают основной и резервный элементы. Под основным понимают элемент системы, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва. Резервный элемент предназначен для выполнения функций основного элемента в случае его отказа. В теории резервирования широко используется понятие **«кратность резерва»** - это отношение числа резервных элементов к числу основных (резервируемых ими) элементов, выраженное несокращённой дробью.

Далее будет идти речь только о **структурном резервировании объектов** без восстановления. Кроме того, для сокращения объёма методических указаний в дальнейшем рассматривается общее и раздельное резервирование (постоянное и замещением) только с целой кратностью.

Постоянным называется резервирование, при котором используется нагруженный резерв и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Нагруженный резерв – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента.

При произвольном законе распределения наработки до отказа отдельных элементов, вероятность отказа $Q_c(t)$ системы изображённой на рисунке 2 вычисляется по формуле

$$Q_c(t) = q_1(t) \times q_2(t) \times \ldots \times q_m(t) = \prod_{j=1}^{m} q_j(t), \tag{17}$$

где $q_j(t)$ - вероятность отказа i-го элемента;

m - общее количество элементов в системе.

Учитывая (3) вероятность безотказной работы этой системы $P_c(t)$ можно рассчитать, используя следующее выражение

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m} q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m} \left(1 - p_j(t)\right), \tag{18}$$

где $q_j(t)$ - вероятность отказа j-го элемента;

$p_j(t)$ - вероятность безотказной работы j-го элемента;

m - общее количество элементов в системе.

Если все элементы системы показанной на рисунке 2 имеют одинаковую надёжность, то формула для вычисления $P_c(t)$ примет вид

$$P_c(t) = 1 - \left(1 - p_j(t)\right)^m. \tag{19}$$

В формуле (19) использованы те же обозначения, что и в равенстве (18).

1.2.4 Расчёт надёжности невосстанавливаемых систем при комбинированном (смешанном) соединении элементов

Смешанным соединением называют сочетание (комбинацию) последовательного и параллельного соединений элементов в системе.

На практике достаточно часто встречаются параллельно-последовательное и последовательно-параллельное соединения элементов.

На рисунке 3 приведена структурная схема системы с параллельно-последовательным соединением элементов (общее резервирование).

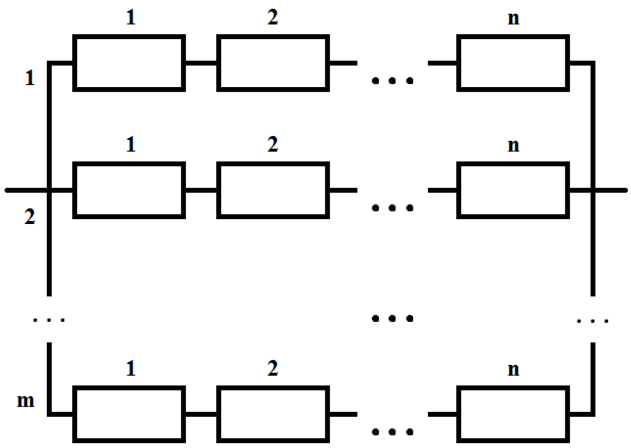

Рисунок 3 – Структурная схема системы с параллельно-последовательным соединением элементов

Расчёт вероятности безотказной работы этой системы целесообразно проводить в следующей последовательности:

1. Рассчитываем вероятность безотказной работы первой последовательности цепи $P_1(t)$ по формуле (15).

2. Из выражения (16) определяем для рассматриваемого последовательного соединения вероятность отказа $Q_1(t)$.

3. Аналогично вычисляем вероятности $P_2(t)$, $P_3(t)...P_n(t)$ и $Q_2(t)$, $Q_3(t)...Q_n(t)$ для остальных последовательных цепочек.

4. Рассчитываем вероятность отказа $Q_c(t)$ всех параллельно соединённых последовательных цепочек по формуле (17).

5. Из выражения (18) находим вероятность безотказной работы всей системы с параллельно-последовательным соединением элементов.

Учитывая сказанное, при произвольном законе распределения наработки до отказа элементов входящих в параллельно-последовательную систему, можно использовать следующую расчётную формулу для вычисления вероятности безотказной работы

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m} Q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m} \left(1 - P_j(t)\right) = 1 - \prod_{j=1}^{m} \left(1 - \prod_{i=1}^{n} p_{ij}(t)\right), \tag{20}$$

где $P_c(t)$ - вероятность безотказной работы параллельно-последовательной системы;

$Q_c(t)$ - вероятность отказа параллельно-последовательной системы;

$Q_j(t)$ - вероятность отказа j-ой параллельно включённой последовательной цепочки;

m - число параллельно включённых последовательных цепочек;

$P_j(t)$ - вероятность безотказной работы j-ой параллельно включённой последовательной цепочки;

$p_{ij}(t)$ - вероятность безотказной работы i-го элемента последовательной цепочки;

n - общее количество последовательно включённых элементов j-ой цепочки.

На рисунке 4 приведена структурная схема системы с последовательно-параллельным соединением элементов (раздельное резервирование). Вероятность безотказной работы $P_c(t)$ этой системы рассчитывается в следующем порядке:

1. Используя формулу (18) определяют вероятность безотказной работы для каждого блока из параллельно включённых элементов.

2. Затем, перемножая вероятности безотказной работы всех блоков из параллельных элементов, вычисляют искомую вероятность для системы в целом.

С учётом сказанного, для $P_c(t)$ можно записать

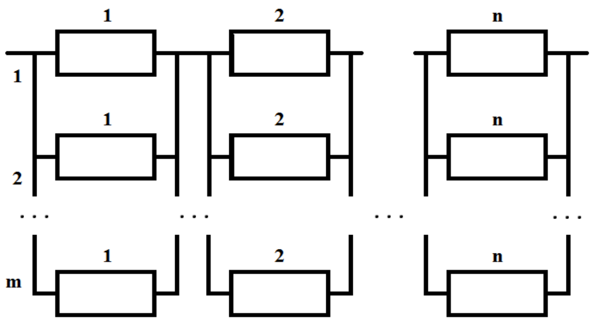

Рисунок 4 – Структурная схема системы с последовательно-параллельным соединением элементов

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \prod_{j=1}^{m} (1 - p_{ji}) \right], \tag{21}$$

где p_{ji} - вероятность безотказной работы j-го элемента в i-м блоке;

m - количество параллельно включённых элементов в i-м блоке;

n - количество последовательно включённых блоков.

1.2.5 Расчёт надёжности невосстанавливаемых систем при сложном соединении элементов

Многие реальные системы имеют такую структуру соединения (или взаимодействия) элементов, которая не может быть сведена ни к параллельно-последовательной, ни к последовательно-параллельной схеме. Наиболее простой пример подобной системы, так называемая мостиковая схема (рисунок 5).

Для расчёта невосстанавливаемых систем при сложном соединении элементов и произвольном законе распределения наработки их до отказа используют несколько методов:

1) метод перебора состояний;

2) метод разложения относительно особого элемента;

3) метод минимальных путей и сечений;

4) логико-вероятностный метод и другие.

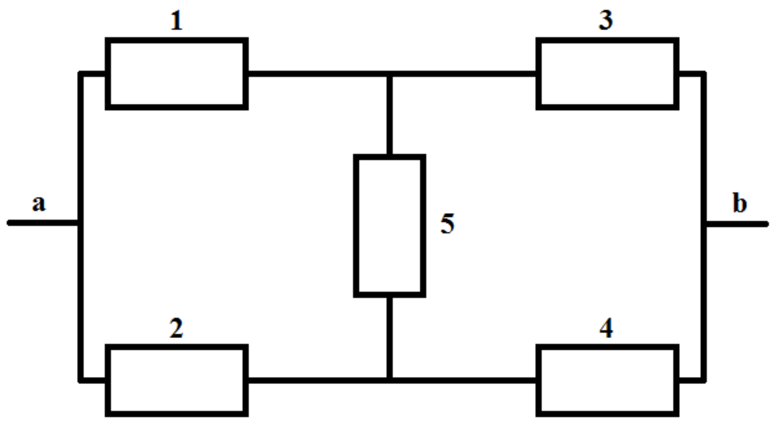

Рисунок 5 – Мостиковая схема соединения элементов

Из-за ограничения объёма методических указаний рассмотрим подробнее наиболее доступных два первых из указанных методов.

1.2.5.1 Метод перебора состояний

Если любой элемент системы может находиться только в двух состояниях: работоспособном и отказа, то произвольная система, состоящая из n элементов, способна находиться в 2^n различных состояниях. В свою очередь, всё множество состояний системы можно разбить на два подмножества: подмножество работоспособных состояний и подмножество не работоспособных состояний, очевидно, что каждое из этих подмножеств состояний характеризуется набором элементов, находящихся в работоспособном и неработоспособном состояниях. При независимых отказах вероятность каждого из состояний определяется произведением вероятностей нахождения элементов в соответствующих состояниях. Тогда вероятность работоспособного состояния системы P_c можно вычислить по формуле

$$P_c = \sum_{j=1}^{m} \prod_{L_j} P_L \prod_{K_j} q_K, \tag{22}$$

где m - общее число работоспособных состояний системы, в каждом j-ом из которых число исправных элементов L_j, а вышедших из строя - K_j.

P_L, q_K - вероятности, соответственно, работоспособного и неработоспособного состояний элементов.

Вероятность отказа такой систему Q_c определяется из выражения

$$Q_c = 1 - \sum_{j=1}^{m} \prod_{L_j} p_L \prod_{K_j} q_K, \tag{23}$$

В формуле (23) использованы те же обозначения, что и в выражении (22).

Вычисления с использованием данного метода удобно представлять в виде таблиц. Например, для схемы, показанной на рисунке 5, перечень её работоспособных состояний приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень работоспособных состояний для мостиковой схемы, приведённой на рисунке 5.

№ сост.	Состояние элементов					Вероятность состояния системы
	1	2	3	4	5	
1	+	+	+	+	+	$p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 \times p_5$
2	-	+	+	+	+	$p_2 \times p_3 \times p_4 \times p_5 \times q_1$
3	+	-	+	+	+	$p_1 \times p_3 \times p_4 \times p_5 \times q_2$
4	+	+	-	+	+	$p_1 \times p_2 \times p_4 \times p_5 \times q_3$
5	+	+	+	-	+	$p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_5 \times q_4$
6	+	+	+	+	-	$p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 \times q_5$
7	-	+	-	+	+	$p_2 \times p_4 \times p_5 \times q_1 \times q_3$
8	-	+	+	-	+	$p_2 \times p_3 \times p_5 \times q_1 \times q_4$
9	-	+	+	+	-	$p_2 \times p_3 \times p_4 \times q_1 \times q_5$
10	+	-	-	+	+	$p_1 \times p_4 \times p_5 \times q_2 \times q_3$

11	+	-	+	-	+	$p_1 \times p_3 \times p_5 \times q_2 \times q_4$
12	+	-	+	+	-	$p_1 \times p_3 \times p_4 \times q_2 \times q_5$
13	+	+	-	+	-	$p_1 \times p_2 \times p_4 \times q_3 \times q_5$
14	+	+	+	-	-	$p_1 \times p_2 \times p_3 \times q_4 \times q_5$
15	-	+	-	+	-	$p_2 \times p_4 \times q_1 \times q_3 \times q_5$
16	+	-	+	-	-	$p_1 \times p_3 \times q_2 \times q_4 \times q_5$

В таблице 1 знаком «+» отмечены работоспособные состояния, а знаком «-» - не работоспособные состояния элементов.

Если просуммировать все вероятности из таблицы 1, то получим правую часть выражения (22).

Пусть, для примера, вероятности безотказной работы за время t элементов мостиковой схемы, показанной на рисунке 5, одинаковы и равны 0,9. Тогда по формуле (22), с учётом данных таблицы 1, запишем

$$P_c(t) = \sum_{j=1}^{m} \prod_{L_j} P_L(t) \prod_{K_j} q_K(t) = p^5(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t) =$$
$$= 0{,}9^5 + 5 \times 0{,}9^4 \times 0{,}1 + 8 \times 0{,}9^3 \times 0{,}1^2 + 2 \times 0{,}9^2 \times 0{,}1^3 = 0{,}978$$

1.2.5.2 Метод разложения относительно особого элемента

Этот метод базируется на известной из математической логики теореме о разложении функции логики по любому аргументу. Применительно к задачам надёжности эта теорема может быть сформулирована следующим образом

$$P = p_i \times P(x_i = 1) + q_i \times P(x_i = 0), \tag{24}$$

где $P(x_i = 1)$ - вероятность состояния работоспособности системы при условии, что i-й элемент абсолютно надёжен;

$P(x_i = 0)$ - вероятность состояния работоспособности системы при условии, что i-й элемент отказал;

p_i - вероятность безотказной работы особого элемента;

q_i - вероятность отказа особого элемента.

Для пояснения данного метода произведём расчёт вероятности безотказной работы для мостиковой схемы, приведённой выше.

Выделим в качестве особого элемент 5 с двумя возможными состояниями: работоспособен (наличие цепи, $x_i = 1$) и отказал (обрыв цепи, $x_i = 0$). При работоспособном элементе 5 мостиковая схема превращается в последовательно-параллельное соединение элементов (рисунок 6). Для этого случая с учётом выражения (21) можно записать

$$P(x_i = 1) = (1 - q_1 \times q_2)(1 - q_3 \times q_4). \quad (25)$$

При отказе элемента 5 эта схема преобразуется в параллельно-последовательное соединение элементов (рисунок 7). В этом случае, используя формулу (20), получаем

$$P(x_i = 1) = 1 - 1(1 - p_1 \times p_3)(1 - p_2 \times p_4). \quad (26)$$

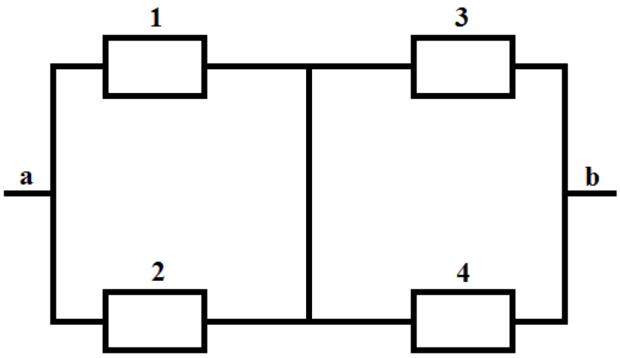

Рисунок 6 – Преобразование мостиковой схемы для случая, если элемент 5 достоверно работоспособен

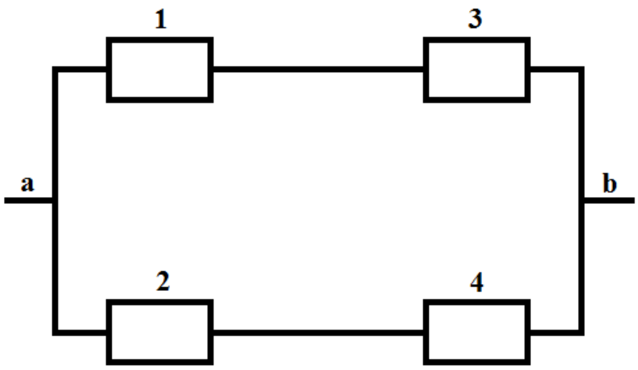

Рисунок 7 – Преобразование мостиковой схемы для случая, если элемент 5 достоверно отказал

Подставляя вероятности (25) и (26) в выражение (24) окончательно получаем

$$P = p_5 \times (1 - q_1 \times q_2)(1 - q_3 \times q_4) + q_5(1 - (1 - p_1 \times p_3)(1 - p_2 \times p_4)). \quad (27)$$

При одинаковой надёжности элементов полученное выражение будет иметь вид

$$P = p(1 - q^2)^2 + q(1 - (1 - p^2)^2). \quad (28)$$

Подставляя в формулу (28) значения вероятностей безотказной работы и отказа дл элементов мостикового соединения соответственно 0,9 и 0,1 получаем тот же результат, что ив вышеприведённом примере

$$P = 0{,}9\left(1-0{,}1^2\right)^2 + 0{,}1\left(1-\left(1-0{,}9^2\right)^2\right) = 0{,}978.$$

Сопоставление обоих методов расчёта надёжности систем при сложном соединении элементов показывает, что выделение особого элемента с последующим анализом упрощённых структурных схем существенно сокращает объём вычислительных действий. Необходимо заметить, что каких-либо чётких рекомендаций по выбору особого элемента, относительно которого производится разложение функции P, сделать, в общем случае, не удаётся.

1.2.6 Учёт законов распределения наработки до отказа элементов при расчёте надёжности систем

1.2.6.1 Основные законы распределения наработки до отказа, используемые в теории надёжности

Все вышеприведённые формулы применимы для объектов с произвольным законом распределения наработки до отказа. Ниже рассмотрим выражения для расчёта надёжности элементов и систем при заданном законе распределения времени работы до отказа.

Непрерывная случайная величина – наработка системы до отказа может описываться различными законами распределения в зависимости от свойств системы и её элементов, условий работы, характера отказов и так далее.

В теории надёжности находят применение следующие непрерывные распределения наработки до отказа:

1. Экспоненциальное (показательное) распределение.

2. Нормальное (гауссовское) распределение.

3. Распределение Вейбулла-Гнеденко.

4. Распределение Рэлея.

5. Гамма-распределение.

6. Логарифмически нормальное распределение.

Наибольшее распространение в практике расчётов надёжности различных систем получил экспоненциальный закон, что объясняется рядом причин.

Во-первых, при постоянных интенсивностях отказов получаются очень простые формулы для оценки показателей надёжности. Это связано с тем, что при $\lambda = const$ вероятность безотказной работы в течение заданной наработки Δt не зависит от наработки, накопленной до начала интервала Δt.

Во-вторых, как показывают исследования, показательное распределение наработки до отказа типичного для объектов, состоящих из многих элементов с различными распределениями времени работы до отказа.

В-третьих, при ограниченных экспериментальных данных трудно обнаружить значительное отклонение от гипотезы $\lambda = const$, даже если имеется возможная нестационарность $\lambda(t)$. Если экспериментальных данных недостаточно, чтобы выявить истинный характер зависимости $\lambda(t)$, принимают в качестве первого приближения $\lambda = const$.

Следует отметить, что экспоненциальное распределение в большинстве случаев используется при рассмотрении внезапных отказов, когда явления износа и старения элементов настолько слабо выражены, что ими можно пренебречь.

Учитывая сказанное, а также ввиду ограниченности объёма методических указаний, далее будет рассмотрено только экспоненциальное распределение наработки объекта до отказа.

В таблице 2 приведены формулы для показателей надёжности невосстанавливаемого объекта (элемента) при экспоненциальном распределении наработки до отказа.

Таблица 2 – Формулы для показателей надёжности невосстанавливаемого объекта при экспоненциальном распределении наработки до отказа

Наименование показателя	**Формула для расчёта**
Вероятность безотказной работы	$P(t) = e^{-\lambda t}$
Вероятность отказа	$Q(t) = F(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
Интенсивность отказов	$\lambda = const$
Плотность распределения (частота отказов)	$f(t) = a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
Средняя наработка до отказа	$T_1 = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$

При расчётах надёжности систем, принципиальным является вопрос о зависимости закона распределения наработки до отказа всего объекта в целом, от вида распределения наработки до отказа входящих в объект элементов.

1.2.6.2 Последовательное соединение элементов с экспоненциальным законом распределения наработки до отказа

В таблице 3 приведены основные показатели надёжности для системы из последовательно соединённых невосстанавливаемых элементов, когда каждый из элементов имеет экспоненциальный закон распределения времени работы до отказа.

Таблица 3 – Основные показатели надёжности для системы из последовательно соединённых невосстанавливаемых элементов, когда каждый из элементов имеет экспоненциальный закон распределения времени до отказа

Наименования показателя	Формула расчёта
Вероятность безотказной работы	$P_c(t)=\prod_{i=1}^{n} e^{-\lambda_i(t)\times t} = e^{-t\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t)} = e^{-t\times\lambda_c(t)}$
Вероятность отказа	$Q_c(t)=1-P_c(t)=1-e^{-t\times\lambda_c(t)}$
Интенсивность отказов	$\lambda_c(t)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t)$
Плотность распределения (частота отказов)	$f_c(t)=a_c(t)=\lambda_c(t)\times e^{-t\times\lambda_c(t)}$
Средняя наработка до отказа	$T_{1c}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i(t)}=\frac{1}{\lambda_c(t)}$

Из таблицы 3 видно, что при последовательном соединении невосстанавливаемых элементов имеющих экспоненциальное распределение наработки до отказа, вся система будет иметь так же показательный закон надёжности.

1.2.6.3. Общее резервирование, все элементы невосстанавливаемые с экспоненциальным законом распределения наработки до отказа

Общее резервирование – это резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Общее резервирование может быть выполнено постоянным или замещением. В подразделе 2.3 даны определения постоянного резервирования и нагруженного резерва. При постоянно включённом резерве основной элемент и все резервные функционируют одновременно, начиная с момента включения в работу. Достоинство такого резервирования состоит в простоте, так как в этом случае переключающие устройства не требуются. Его недостаток состоит в том, что при отказе какого-либо элемента одного элемента могут нарушаться режимы работы остальных.

Резервирование замещением – это резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному, только после отказа основного элемента.

При резервировании замещением возможны три варианта включения резервных элементов: нагруженный, ненагруженный и облегчённый резерв.

Ненагруженный резерв - это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Облегчённый резерв – это резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее ненагруженном режиме, чем основной элемент.

Включение резерва замещением имеет следующие преимущества:

1) не нарушаются режимы работы резервных элементов при отказе остальных;

2) сохраняется надёжность резервных элементов, так как при работе основных элементов они находятся либо в нерабочем, либо в облегчённом состояниях;

3) имеется возможность использовать один резервный элемент для нескольких рабочих.

Существенный недостаток резервирования замещением состоит в том, что для его реализации необходимы переключающие устройства. При поэлементном резервировании число переключающих устройств равно количеству основных функциональных элементов. Такое большое число переключателей часто не позволяет существенно повысить надёжность системы.

Анализ надёжности систем при общем и раздельном резервировании обычно проводят при следующих допущениях:

1) отказы элементов резервированной системы являются простейшим потоком случайных событий (наработка до отказа имеет экспоненциальное распределение);

2) переключающие устройства идеальны (абсолютно надёжны), а основная и все резервные системы имеют одинаковую надёжность.

Введём обозначения: n - число основных элементов в системе; m - число резервных цепей; $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i-ого элемента; λ_0 - интенсивность отказов любой из $m+1$ систем, $ч^{-1}$.

В таблицах 4 и 5, с учётом принятых обозначений, приведены основные формулы, используемые для расчёта надёжности систем при общем резервировании с нагруженным и ненагруженным резервом.

Таблица 4 – Основные показатели надёжности системы при общем резервировании с нагруженным («горячим») резервом

Наименование показателя	**Формула для расчёта**
Вероятность безотказной работы	$P_c(t)=1-\left(1-e^{-\lambda_0\times t}\right)^{m+1}$
Вероятность отказа	$Q_c=\left(1-e^{-\lambda_0\times t}\right)^{m+1}$
Интенсивность отказов	$\lambda_c(t)=\dfrac{a_c(t)}{P_c(t)}$
Плотность распределения (частота отказов)	$f_c(t)=a_c(t)=\lambda_0\times(m+1)\times e^{-\lambda_0\times t}\times\left(1-e^{-\lambda_0\times t}\right)^m$
Средняя наработка до отказа	$T_{1c}=\dfrac{1}{\lambda_0}\times\left(1+\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{3}+...+\dfrac{1}{m+1}\right)=\dfrac{1}{\lambda_0}\times\sum_{i=0}^{m}\dfrac{1}{i+1}$

Вычисление вероятности безотказной работы систем при общем резервировании с облегчённым («тёплым») резервом рекомендуется производить по формуле

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c \times t} \times \left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!}\left(1 - e^{-\lambda_1 \times t}\right)^i\right], \tag{29}$$

где $a_i = \prod_{j=0}^{i-1}\left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1}\right)$;

λ_0 - интенсивность отказов основной системы, $ч^{-1}$;

λ_1 - интенсивность отказов резервной системы до момента отказа основной системы, $ч^{-1}$;

n - число элементов системы;

m - кратность резервирования.

Таблица 5 – Основные показатели надёжности системы при общем резервировании с ненагруженным («холодным») резервом

Наименование показателя	**Формула для расчёта**
Вероятность безотказной работы	$P_c(t) = e^{-\lambda_0 \times t} \times \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 \times t)^i}{i!}$
Вероятность отказа	$Q_c = 1 - e^{-\lambda_0 \times t} \times \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 \times t)^i}{i!}$
Интенсивность отказов	$\lambda_c(t) = \frac{a_c(t)}{P_c(t)}$
Плотность распределения (частота отказов)	$f_c(t) = a_c(t) = \frac{\lambda_0^{m+1}}{m!} \times t^m \times e^{-\lambda_0 \times t}$
Средняя наработка до отказа	$T_{1c} = \frac{1}{\lambda_0} \times (m+1)$

Выражения для расчёта других показателей надёжности при данном виде резервирования и облегчённом резерве в методических указаниях не приводятся из-за их громоздкости.

1.2.6.4 Раздельное (поэлементное) резервирование замещением, все элементы с экспоненциальным законом распределения наработки до отказа

Раздельное резервирование – это резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

При раздельном резервировании системы так же, как и в случае общего резервирования, возможны три варианта включения резервных элементов: нагруженный, ненагруженный и облегчённый резерв.

С учётом принятых в подразделе 2.6.3. допущений, при облегчённом резерве вероятность безотказной работы $P_c(t)$ определяется по формуле

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 \times t} \prod_{i=1}^{n} \left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{a_i}{i!} \times \left(1 - e^{-\lambda_1 \times t}\right)^i \right]. \qquad (30)$$

Если используется ненагруженный резерв, то вероятность безотказной работы $P_c(t)$ вычисляются из выражения

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 \times t} \times \prod_{i=1}^{n} \left[\sum_{j_L=0}^{m} \frac{\left(\lambda_0 (t)^{i_j}\right)}{i^{j!}} \right]. \qquad (31)$$

В выражениях (30) и (31) использованы те же обозначения, что и в уравнениях (29), причём $\lambda_0(t)$ - интенсивность отказов элементов, $ч^{-1}$.

При раздельном резервировании замещением, даже когда все элементы имеют экспоненциальный закон распределения наработки до отказа, получить удобные формулы для T_1, $a(t)$, $\lambda(t)$ в общем виде не удаётся. Поэтому, эти количественные характеристики надёжности рекомендуется определять для каждого конкретного случая.

Анализ выражений, приведённых в таблицах 4 и 5, а также формул (29) – (31) показывает, что если наработка до отказа у невосстанавливаемого изделия имеет экспоненциальное распределение, то при применении резервирования возникает не экспоненциальное распределение времени работы изделия до отказа. В частности, при использовании ненагруженного резервирования замещением (когда основной и резервные элементы имеют экспоненциальное распределение наработки до отказа) для зарезервированной системы в целом возникает гамма-распределение наработки до отказа.

1.2.6.5 Примеры расчёта показателей надёжности при различных распределениях

При нормальном (гауссовском) законе распределения.

Задача. Источником питания прибора является батарея, время безотказной работы которой подчиняется нормальному закону с параметрами $m_\tau = 30ч$ и $\sigma = s = 4ч.$Какова вероятность безотказной работы и отказа в течение последующих 5 часов работы?

Решение.

Если используется центрированная и нормированная функция Лапласа $\Phi(z)$ с заменой переменных $z = \frac{(\tau - m_\tau)}{s}$, то вероятность отказа $Q(\tau)$ и вероятность безотказной работы $P(\tau)$ рассчитывается по выражениям:

$$Q(\tau) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{\tau - m_\tau}{s}\right) \text{ и } P(\tau) = 0{,}5 - \Phi\left(\frac{\tau - m_\tau}{s}\right).$$

Воспользуемся таблицей (6) стандартного, нормированного распределения:

Таблица 6 – Данные нормированного распределения функции $\Phi(z)$.

z	0,0	0,50	1,0	1,24	1,26	1,50	2,0	2,5	3,0	4,0
$\Phi(z)$	0,0	0,1915	0,3413	0,3413	0,3962	0,4332	0,4772	0,4938	0,4986	0,4999

$$Q(30+5)=0{,}5+\Phi\left(\frac{35-30}{4}\right)=0{,}5+\Phi(1{,}25)=0{,}5+0{,}394=0{,}894;$$

$$P(35)=0{,}5-\Phi\left(\frac{35-30}{4}\right)=0{,}5-\Phi(1{,}25)=0{,}5-0{,}394=0{,}106;$$

или $P(\tau)=1-Q(\tau)=1-0{,}894=0{,}106.$

Расчёт показывает, что вероятность отказа батареи при заданных условиях высокая .(0,894), а вероятность безотказной работы низкая (0,106). Для повышения последней необходимо принимать меры, например, резервирование источника питания (батареи) прибора или применения батареи с большей ёмкостью.

При экспоненциальном законе распределения.

Задача. Определить вероятность безотказной работы $P(\tau)$ прибора и отказа $Q(\tau)$ в течение $\tau=10^4\,час,$ при интенсивности отказов $\lambda=10^{-8}\ {}^1\!/_ч$.

Решение. $P(\tau)=e^{-\lambda\tau}=2{,}71^{10^{-8}\cdot 10^4}=0{,}9999.$ Поскольку $\lambda\tau=10^{-8}\cdot 10^4=10^{-4}<0{,}1$, то при $\lambda\tau\le 0{,}1$ упрощается расчёт в результате разложения в ряд и отбрасывания малых членов

$P(\tau)=1-\lambda\tau+\dfrac{(\lambda\tau)^2}{2!}-\dfrac{(\lambda\tau)^3}{3!}+...=1-\lambda\tau,$ можно принять выражение $P(\tau)=1-\lambda\tau=1-10^{-4}=0{,}9999.$

$$Q(\tau)=1-P(\tau)=1-0{,}9999=0{,}0001.$$

Имеем высокую вероятность безотказной работы прибора и низкую вероятность отказов при заданных условиях.

При законе распределения Вейбулла.

Задача. Оценить вероятность безотказной работы $P(\tau)$ подшипников качения в течение времени $\tau=10^4\,час,$ если ресурс подшипников описывается распределением Вейбулла с параметрами $\tau_0=10^7\,ч;\ m=1{,}5.$

Решение. Пользуясь выражением вероятности безотказной работы $P(\tau)=e^{-\tau^{\frac{m}{\tau_0}}}$, имеем $P(10^4 ч)=e^{-10^4\cdot\frac{1{,}5}{10^7}}=0{,}905.$

Если пользоваться другим выражением $P(\tau)=e^{-(\tau-a)^b}$, где a, b - коэффициенты $\left(a=\tau_0^{1/m}, b=m\right)$, тогда $P(\tau)=e^{-\left(\tau-\tau_0^{1/m}\right)^m}$. Для расчёта по последнему выражению необходимо использовать таблицу значений 7:

Таблица 7 – Значение коэффициентов распределения Вейбулла.

m	0,40	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
$в_m$	3,32	2,00	1,00	0,903	0,886	0,887
c_m	10,40	4,47	1,0	0,615	0,463	0,380

В этом случае

$$P\left(10^4 ч\right)=2{,}71^{-\left[10^4-\left(10^7\right)^{1/1,5}\right]^{1,5}}=0{,}905.$$

Вероятность отказа для данных условий

$$Q\left(10^4 ч\right)=1-P(\tau)=1-0{,}905=0{,}095.$$

Пример расчёта ПН при сложной схеме. Дана структурно-логическая расчетная схема пускорегулирующей аппаратуры (рис. 8). Известны вероятности безотказной работы входящих в ней элементов. Требуется найти вероятности безотказной работы системы в целом. Система состоит из двух цепей (A, B, C и D) разной надёжности, включённых параллельно.

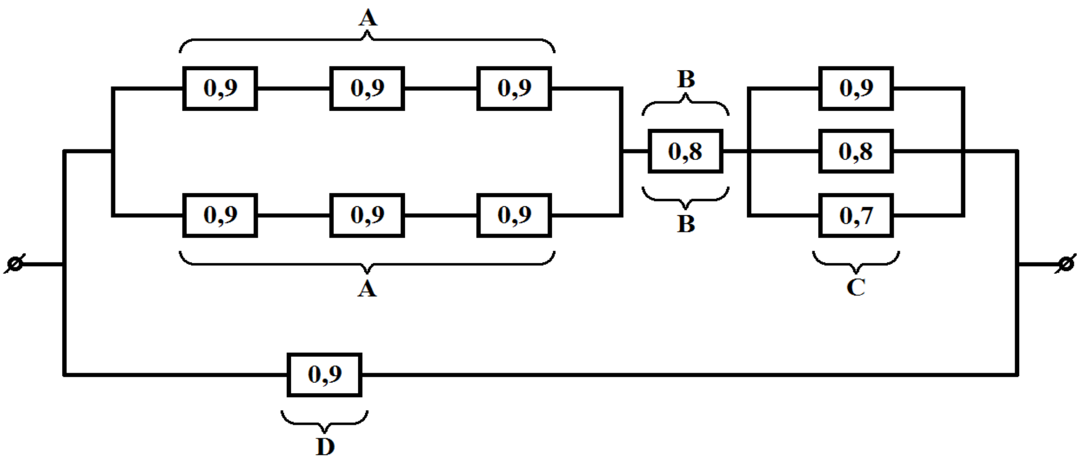

Рисунок 8 – Параллельно-последовательная схема расчёта показателей надёжности

Расчёт ведётся поэтапно.

1. Определяем надёжность блока А для параллельно-последовательной схемы с одинаковой вероятностью безотказности.

$$P_A=1-\left(1-P^n\right)^m=1-\left(1-0{,}9^3\right)^2=0{,}93.$$

2. Блок В не резервируемый имеет вероятность безотказной работы $P_B=0{,}8$.

3. Вероятность безотказной работы блока С с параллельной схемой

$$P_C = 1 - \prod_{j=1}^{m} (1 - P_i) = 1 - (1 - 0{,}9)(1 - 0{,}8)(1 - 0{,}7) = 0{,}994.$$

4. Вероятность безотказной работы последовательной цепочки АВС:

$$P_{ABC} = \prod_{i=1}^{n} P_i = 0{,}93 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}994 = 0{,}74.$$

5. Вероятность безотказной работы всей резервированной параллельно-соединённой системы

$$P_C = 1 - (1 - P_{ABC})(1 - P_D) = 1 - (1 - 0{,}79)(1 - 0{,}9) = 0{,}974.$$

1.3. ТИПОВЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НА АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЯХ

Задача 3.1.

На испытания поставлено 400 однотипных изделий – датчиков контроля содержания окиси углерода в атмосферном воздухе. За время 3000 часов отказало 200 датчиков. За следующий интервал времени 100 часов отказало ещё 100 изделий. Требуется определить следующие показатели надёжности: $P^*(3000)$, $P^*(3100)$, $a^*(3050)$, $\lambda^*(3050)$.

Задача 3.2.

На испытания поставлены 1000 извещателей системы автоматического пожаротушения. Отказавшие изделия не подлежат восстановлению и не заменялись новыми. Число отказов фиксировалось через каждые 100 часов работы. Данные об отказах приведены в таблице 8. Требуется вычислить показатели надёжности пожарных извещаетелей по данным испытаний и построить их зависимости от времени.

Таблица 8 – Данные об отказах пожарных извещателей к задаче 3.2.

$\Delta t_i, ч$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, ч$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, ч$	$n(\Delta t_i)$
0-100	50	1000-1100	15	2000-2100	12
100-200	40	1100-1200	14	2100-2200	13
200-300	32	1200-1300	14	2200-2300	12
300-400	25	1300-1400	13	2300-2400	13
400-500	20	1400-1500	14	2400-2500	14
500-600	17	1500-1600	13	2500-2600	16
600-700	16	1600-1700	13	2600-2700	20
700-800	16	1700-188	13	2700-2800	25
800-900	15	1800-1900	14	2800-2900	30
900-1000	14	1900-2000	12	2900-3000	40

Задача 3.3 Система экологического контроля состоит из пяти блоков. При отказе любого блока отказывает вся система. Надёжность блоков характеризуется вероятностью отказа за 1000 часов, которая соответственно равна: $Q_1(1000)=0{,}02,\ Q_2(1000)=0{,}01,\ Q_3(1000)=0{,}03,\ Q_4(1000)=0{,}015,\ Q_5(1000)=0{,}025.$ Требуется определить вероятность безотказной работы системы за 1000 часов.

Задача 3.4.

Используя исходные данные задачи 3.3. требуется вычислить среднюю наработку до отказа системы экологического контроля, если дополнительно известного, что для её блоков справедлив экспоненциальный закон надёжности.

Задача 3.5.

Рассчитать вероятность безотказной работы на время t мостиковой схемы, показанной на рисунке 5. Вероятности отказов элементов принять такими же, как в задаче 3.3.

Задача 3.6.

Модуль исполнения автоматической установки пожаротушения имеет вероятность безотказной работы $P(1000)=0{,}98.$ Для повышения надёжности его работы проводится резервирование с кратностью 2/1 такими же модулями. Вычислить вероятность безотказной работы резервированной системы за 1000 часов в случае:

1) если резерв ненагруженный, а переключающие устройства абсолютно надёжные;
2) если резервирование постоянное, а резерв нагруженный.

Закон надёжности для модулей экспоненциальный.

1.4. ДОМАШНЕЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЕ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Контрольная работа по курсу «Надёжность и эффективность средств техносферной безопасности» включает 2 теоретических вопроса (см. таблицу 9) и задачу по расчёту структурно-функциональной надёжности систем с резервированием.

Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера зачётной книжки.

Таблица 9

№ вариантов	Содержание вопросов
I	II
01	1.Надёжность – основная характеристика качества изделия 2. Последовательность определения надёжности
02	1.Понятие надёжности и эффективности 2.Функциональная и расчётно-логическая схемы для расчёта надёжности
03	1.Основные задачи теоретической и прикладной надёжности 2.Схема последовательного соединения элементов для расчёта надёжности
04	1.Дать определение понятия: объект, элемент, система,

	работоспособность, безотказность, ремонтопригодность 2.Схема параллельного соединения элементов для расчёта надёжности
05	1.Дать определения понятий: долговечность, сохраняемость, отказ, наработка до отказа, наработка на отказ, технический ресурс, срок службы 2.Параллельно-последовательная схема соединения элементов для расчёта надёжности
06	1.Единичные показатели надёжности по свойству безотказности 2.Построение графов состояний восстанавливаемых систем
07	1.Комплексные показатели надёжности по свойству безотказности 2.Формирование основных параметров систем и их предельных значений
08	1.Показатели надёжности по свойству ремонтопригодности 2.Допустимые отклонения основных параметров устройств. Формирование параметрических отказов
09	1.Показатели надёжности по свойству долговечности 2.Понятие «слабого звена» устройства
10	1.Показатели надёжности по свойству сохраняемости 2.Расчёт параметрической составляющей надёжности по постепенным отказам
11	1.Номенклатурапоказателей надёжности изделий вида I 2.Расчёт единичных показателей надёжности
12	1.Определение номенклатурных показателей надёжности изделия 2.Расчёт комплексных показателей надёжности
13	1.Номенклатура показателей надёжности изделий вида II 2.Общий подход к оценке эксплуатационно-прочностной надёжности
14	1.Методика корелирования значений показателей надёжности по фактору экономической эффективности 2.Эксплуатационно-прочностная надёжность по критерию
15	1.Методы нормирования показателей надёжности 2.Эксплуатационно-прочностная надёжность по критерию
16	1.Понятие отказа. Классификация отказов 2.Эксплуатационно-прочностная надёжность по критерию теплостойкости
17	1.Отказ – случайное событие. Распределение времени безотказной работы 2.Понятие эффективности средств экологической безопасности
18	1.Закон нормального распределения показателей надёжности 2.Техническая составляющая эффективности
19	1.Закон экспоненциального распределения показателей надёжности 2. Экономическая составляющая эффективности
20	1.Закон Вейбулла распределения показателей надёжности 2.Понятие составляющих надёжности: структурно-функциональная, параметрическая, эксплуатационно-просностная

Задача 3.7.

Определить вероятность безотказной работы невосстанавливаемой системы экологической безопасности (рис. 9) при $P_C = 1000ч$.

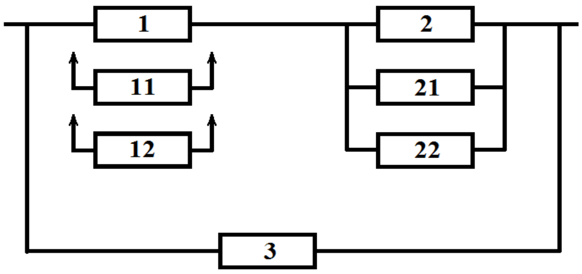

Рисунок 9 – Расчётная параллельно-последовательная схема

Дано: Вероятности безотказной работы P_1, P_2, P_3 за 1000 ч приведены по вариантам в табл. 10. Резервные элементы имеют одинаковую надёжность с основными. Закон распределения наработки до отказа элементов – экспоненциальный. Элемент 1 имеет резерв, не нагружен замещением. А элемент 2 – постоянный (нагруженный). Переключающие устройства считать абсолютно надёжными.

Таблица 10 – Вероятность безотказной работы элементов 1, 2, 3 за 1000 часов.

№ вар.	P_1,	P_2,	P_3	№ вар.	P_1,	P_2,	P_3	№ вар.	P_1,	P_2,	P_3
1	0,5	0,7	0,9	8	0,1	0,2	0,7	15	0,3	0,2	0,7
2	0,4	0,3	0,7	9	0,2	0,5	0,8	16	0,2	0,4	0,9
3	0,2	0,3	0,9	10	0,3	0,6	0,9	17	0,7	0,8	0,9
4	0,1	0,3	0,5	11	0,3	0,4	0,6	18	0,4	0,6	0,9
5	0,2	0,4	0,6	12	0,4	0,5	0,6	19	0,7	0,7	0,9
6	0,6	0,7	0,8	13	0,5	0,6	0,7	20	0,1	0,3	0,8
7	0,3	0,4	0,7	14	0,7	0,8	0,9	21	0,2	0,5	0,8

Индивидуальные задания выполняются на листах формата А4 в соответствии с требованиями образцов оформления работ, полученных на кафедре ТБ.

1.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА ПО АУДИТОРНОМУ ЗАНЯТИЮ

Отчёт по практическому занятию должен содержать:

1. Название и цель занятия.

2. Краткие теоретические сведения.

3. Решение типовых задач с необходимыми пояснениями.

4. Выполненное индивидуальное расчётно-практическое задание.

5. Выводы.

РАЗДЕЛ 2

НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ НЕРЕЗЕРВИРУЕМЫХ СРЕДСТВ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1 НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СРЕДСТВ БЕЗОПАСНОСТИ

2.1.1 Потоки отказов и восстановлений систем

Обеспечение надежности технических объектов (изделий, систем, установок, элементов) достигается двумя путями: резервированием элементов (о чем шла речь выше) и восстановлением работоспособности после отказов элементов путем диагностического осмотра и ремонта.

Для восстанавливаемых объектов характерны случайные потоки отказов работоспособности элементов во времени t_o и восстановления работоспособности во времени $t_в$, соответственно с интенсивностями λ_o и $\mu_в$. Эти потоки обладают особыми свойствами, или им можно приписать эти свойства с допустимой погрешностью с тем условием, чтобы выбрать известный математический аппарат для оценки показателей надежности.

Наиболее удобным для аналитических оценок является простейший поток, который характеризуется следующими свойствами: стационарностью отказов, т.е. постоянством интенсивности отказов, а значит $\lambda = const$; отсутствием последействия, т.е. отказы независимы между собой; наличием ординарности, т.е. вероятность попадания в интервал, отказ зависит от величины интервала времени Δt, а не от того с какого места начат его отсчет.

Потоки отказов работоспособности и ее восстановления объектов с отмеченными свойствами описываются выражением закона Пуассона, а время безотказности и восстановления подчиняется экспоненциальному распределению. Отмеченное выше позволяет определиться с выбором математического аппарата количественной оценки показателей надежности проектируемых изделий.

2.1.2 Математический аппарат аналитической оценки надежности

Потоки отказов и восстановлений формируют состояние S системы (объекта, установки) и ее элементов, которые при их функционировании переходят из одного состояния в другое. При этом формируются совокупности состояний и переходов, которые изображаются в виде графов, диаграмм, древов. Их графическое изображение производится на основе теории графов, по которым выполняются аналитические оценки показателей надежности. Для расчета этих показателей применяются различные методы, выбор которых определяется стандартом ГОСТ 27.301-95 и его приложением. При разработке и проектировании объектов основными методами расчета являются структурные.

Для математического описания графа переходов состояний широко применяются Марковские модели случайных процессов. Они применяются как для резервируемых, так и нерезервируемых, как для невосстанавливаемых, так и восстанавливаемых систем (элементов), при экспоненциальном распределении наработок до отказа и на отказ.

Графы состояний объектов, при допущении того, что поток событий случайный во времени является пуассоновским, время безотказной работы, а также время восстановления элементов, подчиняется экспоненциальному распределению, описываются аппаратом Марковского процесса в виде систем дифференциальных уравнений.

Рассмотрим вид графа на примере упрощенной декомпозиции автоматической системы экологического мониторинга, структурно состоящую из трех элементов: поста контроля ПК параметров окружающей среды ПКОС; канала связи КС; центральной ЭВМ. Схема системы АСКОС представлена на рисунке 10.

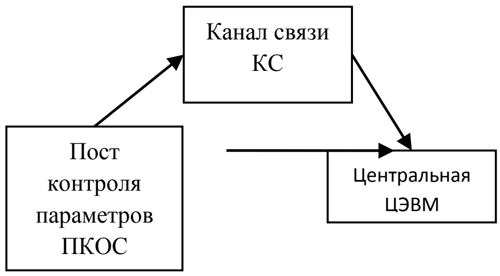

Рисунок 10 – Структура АСКОС

Система восстанавливаемая, нерезервируемая. Отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, т.к. структурная расчетная схема надежности представляет собой структуру последовательно соединенных элементов ПКОС$\rightarrow$КС$\rightarrow$ЭВМ.

Изобразим функционирование данной системы с помощью теории графов (рис. 11):

S_0 – состояние безотказной работы АСКОС;

S_1 – состояние поста контроля после отказа;

S_2 – состояние канала связи после отказа;

S_3 – состояние центральной ЭВМ после отказа.

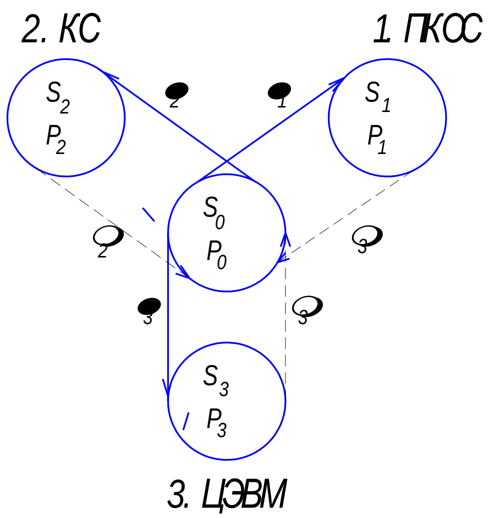

Рисунок 11 – Графическое представление состояний АСКОС:

λ – интенсивность отказов; μ – интенсивность восстановлений.

Система из состояния S_0 переходит в состояние S_1 с интенсивностью отказа λ_1, а из S_1 в S_0 с интенсивностью восстановления μ_1 и соответственно в другие состояния S_2 и S_3 по этой же схеме с вероятностями P_0, P_1, P_2, P_3.

Вероятность нахождения системы в данном состоянии описывается Марковской моделью по схеме:

$S_0 \rightarrow P_0$; $S_1 \rightarrow P_1$; $S_2 \rightarrow P_2$; $S_3 \rightarrow P_3$.

Вероятность изменения этого состояния S_0 за малый промежуток времени $(dt) \rightarrow 0$ описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dP_0}{dt} = -\lambda_1 P_0 + \mu_1 P_1 - \lambda_2 P_0 + \mu_2 P_2 - \lambda_3 P_0 + \mu_3 P_3, \qquad (32)$$

где $\lambda_i P_i$ – выражения состояний.

Вероятность P_i состояния элементов S_i описывается системой аналогичных дифференциальных уравнений. Решение системы дифференциальных уравнений затруднительно, и для этого необходимо знать интенсивности отказов λ_i и восстановлений μ_i, которые определяются опытным путем.

Колмогоровым составлена другая система дифференциальных уравнений, которая трансформирована в систему простых алгебраических уравнений. Решение этой системы достигнуто путем нормирования вероятностей $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$.

Решив систему алгебраических уравнений, определяется P_0, которая характеризует коэффициент готовности $K_г$, т.е. показателем надежности восстанавливаемых нерезервируемых систем в стационарном режиме. Его выражение имеет вид

$$К_г = P_0 = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3}\right)^{-1}. \qquad (33)$$

Изложенный подход и оценка надежности по формуле (33) удовлетворяет большинству средств (объектов, систем) техносферной безопасности, функционирующих в одном стационарном режиме. Но применительно к автоматическим установкам пожаротушения и взрывоподавления, выражение (33) требует уточнения с учетом того, что они функционируют в двух особых режимах: дежурном (ожидания) и действия (тушения загорания).

2.1.3 Оценка надежности автоматических установок пожаротушения и взрывоподавления

Выше отмеченные режимы функционирования автоматических установок пожаротушения АУП и системы взрывоподавления загораний СВП существенно отличаются по загруженности этих средств. Режим тушения и взрывоподавления более загруженный и более тяжелый.

Формула (33) справедлива для оценки надежности АУП и СВП, находящихся в дежурном режиме, т.е. в режиме ожидания опасности (загорания).

Для оценки полной надежности $P_с$ по показателю вероятности безотказности указанных выше средств, функционирующих в режимах ожидания и исполнения, необходимо учитывать их вероятности в этих режимах $P(t)_{ож}$ и $P(t)_{ис}$. Поскольку эти режимы последовательные во времени, то формула (33) приобретает следующий общий вид

$$P(t)_с = P(t)_{ож} \times P(t)_{ис} \qquad (34)$$

Первый сомножитель (34) такой же, как в (33), а второй сомножитель по форме записи такой же, но с другими значениями интенсивностей потоков λ и μ.

Но это можно представить только теоретически, поскольку в настоящее время нет самотестирующихся АУП и СВП. Делаются только попытки (желания) создания таких средств, а, следовательно, не может быть и значений λ и μ в режиме исполнения.

Формулу (34) можно трансформировать к следующему виду, выразив второй сомножитель его статистической оценкой, т.е.

$$P(t)_{ис} = \frac{N - n}{N}, \qquad (35)$$

где N – число установок, испытываемых в полигамных условиях, или принятое по данным журналов на реальных объектах;

n – число сработавших установок (испытаний) непотушивших загораний.

С учетом отмеченного, расчетное выражение оценки полной надежности АУП и СВП имеет вид

$$K_г = P_c = (1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_3}{\mu_3})^{-1} \times (\frac{N-n}{N}) \qquad (36)$$

Численные значения интенсивности отказов λ_i и интенсивности восстановлений μ_i определяются по среднему времени безотказности T_0 и среднему времени восстановления $T_в$, т.е. $\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$ и $\mu_в = \frac{1}{T_в}$, т.к. эти параметры постоянные и подчиняются экспоненциальному распределению.

2.1.4 Задача оценки надежности АУП

Оценить уровень надежности по коэффициенту готовности $K_г$ (вероятности безотказности P_c) автоматической установки пенного тушения в случае возникновения загорания емкости с нефтепродуктами. Декомпозиция установки представлена модулями: установка пожарной сигнализации УПС; собственно установка пожаротушения УТЗ; огнетушащее вещество (механическая пена) ВО.

Из журналов учета состояния АУП получены реальные значения среднего времени безотказности $T_о$ и среднего времени восстановления $T_в$ в реальных условиях Лисичанского нефтеперерабатывающего завода и других предприятий:

$T_{о}$, ч	$T_{в}$, ч
УПС – 6735,8	32,36
УТЗ – 7518,8	33,20
ВО – 4830,9	32,40.

Кроме того, из 47 сработавших установок 3 установки не обеспечили тушения загораний.

Решение.

Вычисляются интенсивности отказов и восстановлений отдельных модулей:

$\lambda_0 = \frac{1}{T_0}$, ч$^{-1}$	$\mu_в = \frac{1}{T_в}$, ч$^{-1}$
УПС – $1{,}485 \cdot 10^{-4}$	$3{,}09 \cdot 10^{-2}$
УТЗ – $1{,}330 \cdot 10^{-4}$	$3{,}02 \cdot 10^{-2}$
ВО – $2{,}07 \cdot 10^{-5}$	$3{,}08 \cdot 10^{-2}$

По исходным данным рассчитывается по формуле (36) надежность АУП,

$$P_c = \frac{1}{(1+\frac{1,485\times10^{-4}}{3,09\times10^{-2}}+\frac{1,33\times10^{-4}}{3,02\times10^{-2}}+\frac{2,07\times10^{-4}}{3,08\times10^{-2}})}\times(\frac{47-3}{47}) = 0,927.$$

Вывод.

Для производственных условий надежность автоматической пожарной защиты высокая.

2.1.5 Индивидуальное расчетно-графическое задание

Дать схему емкости с нефтепродуктами, оборудованной АУП, с расчетом надежности пожарной защиты по вариантам, приведенным в таблице 11.

Таблица 11 – Данные по среднему времени безотказности T_o и восстановлению $T_в$ элементов АУП

№ вариантов	Время безотказности по элементам в часах			Время восстановления по элементам в часах		
	УПС	УТЗ	ВО	УПС	УТЗ	ВО
1	2	3	4	5	6	7
01	7000	7510	4800	35,5	33,2	32,4
02	7500	7600	5020	32,3	35,5	31,5
03	7200	7410	4900	33,3	32,5	30,7
04	7300	7200	5000	31,2	31,6	32,9
05	6900	7300	4500	30,5	30,8	33,5
06	6500	7700	4700	29,5	25,9	30,9
07	6850	7800	4950	28,6	27,8	32,2
08	6990	7550	5600	30,4	30,5	32,5
09	7100	6980	4800	33,5	30,9	32,8
10	7350	6500	5100	40,2	33,5	30,0
11	6950	7100	4200	42,5	34,5	32,5
12	7300	7150	4805	35,3	33,2	30,5
13	7250	7200	4500	35,2	32,9	33,1
14	7100	7320	4550	35,1	32,7	32,9

15	7150	7300	4420	34,2	32,5	31,8
16	6600	7120	4400	34,5	30,8	31,7
17	6800	7680	4950	35,1	31,9	32,1
18	6900	6950	7150	31,5	32,7	31,2
19	7150	6850	7110	30,8	32,9	30,9
20	7300	6350	6930	30,9	31,9	32,6
21	7450	7110	7100	41,2	32,6	31,6

Заключение (выводы)

Оценивается достаточность надежности АУП и приводятся другие дополнительные меры пожарной безопасности.

Требования к выполнению задания.

Отчёт выполняется на листах формата А4, которые скрепляются с левой стороны при помощи степлера. Текст пишется с одной стороны листа, шариковой ручкой чёрного или синего цвета. Размеры полей на листе: левое – 20 мм, правое, верхнее и нижнее – 10 мм. Отчёт должен иметь титульный лист, на котором указывается название университета и кафедры, название учебной дисциплины и практического занятия, фамилия, имя и отчество студента, а также шифр учебной группы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87; введён 1997-01-01. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов. - 16с. – (Система стандартов по надёжности в технике)

2. ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введён 1990-07-01. – М.: Изд-во стандартов. - 37с. – (Система стандартов по надёжности в технике)

3. Черкесов Г. Н. Надёжность аппаратно-программных комплексов: учебное пособие для вузов /Г. Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479с.

4. Дружинин Г. В. Надёжность автоматизированных производственных систем /Г. В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480с.

5. Ястребенецкий М. А. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами: учебное пособие для вузов /М. А. Ястребенецкий, Г. М. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. –264с.

6. Севриков В. В. Надёжность и эффективность автоматических установок пожаротушения /В. В. Севриков, В. А. Карпенко, И. В. Севриков. – М.: Машиностроение, 1993. – 104с.

7. Козлов Б. А. Справочник по расчёту надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики /Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 472с.

8. Синопальников В. А. Надёжность и диагностика технологических систем: учебник для вузов /В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М.: Высшая школа, 2005. – 343с.

9. Хазов Б. Ф. Справочник по расчёту надёжности машин на стадии проектирования /Б. Ф. Хазов, Б. А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с.

10. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие для втузов /в. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 400с.