

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта

Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

**Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине**

**«Надежность технических систем и
техногенный риск»**

Составитель:
Киндеев Е.А.

Владимир, 2016

Практические занятия

Цель практических занятий состоит в прочном усвоении знаний, полученных в ходе изучения дисциплины путем решения практических задач, в овладении умением анализировать полученные результаты и делать соответствующие выводы. Студенты при решении поставленных задач используют лекционный материал, а также источники и литературу, указанную в конце каждого практического занятия.

Практическое занятие 1

по теме 2 «Показатели надежности деталей автомобиля»

Основные положения теории

Для количественной оценки надежности используются показатели: единичные показатели, которые оценивают одно из свойств надежности, и комплексные показатели, которые оценивают несколько свойств.

Показатели безотказности невосстанавливаемого объекта

Невосстанавливаемые объекты в случае отказа заменяются новыми.

Обозначим: t – текущая наработка объекта, τ – время жизни объекта.

Для любого t существует такая вероятность F того, что τ не превысит t $F(\tau < t)$, где $F(t)$ - вероятность отказа.

$P(t) = 1 - F(t)$ - вероятность безотказной работы.

Вероятность отказов и безотказной работы могут быть определены на основе экспертных данных.

$$F(t) = \frac{n(t)}{N}; P(t) = \frac{m(t)}{N}, \quad (1)$$

где $n(t)$ – число изделий, отказавших к наработке t ;

$m(t)$ – число изделий, работоспособных к наработке t ;

N – общее число изделий на начало эксплуатации.

Так как автомобиль и его агрегаты работают во времени непрерывно, то существует непрерывная плотность вероятности отказа (рис.1.) данных элементов.

$$f(t) = \frac{dF}{dt}. \quad (2)$$

Зная соответствующие изменения плотности распределения $f(t)$, можно определить вероятность отказа $F(t)$ и безотказной работы $P(t)$.

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt; \quad (3)$$

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt . \quad (4)$$

Средняя наработка до отказа – мат. ожидание наработки до 1 отказа объекта.

$$T_1(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt . \quad (5)$$

Из опытных данных средняя наработка до отказа определяется:

$$T_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i , \quad (6)$$

где N – общее число объекта; τ_i - наработка до первого отказа любого из объектов.

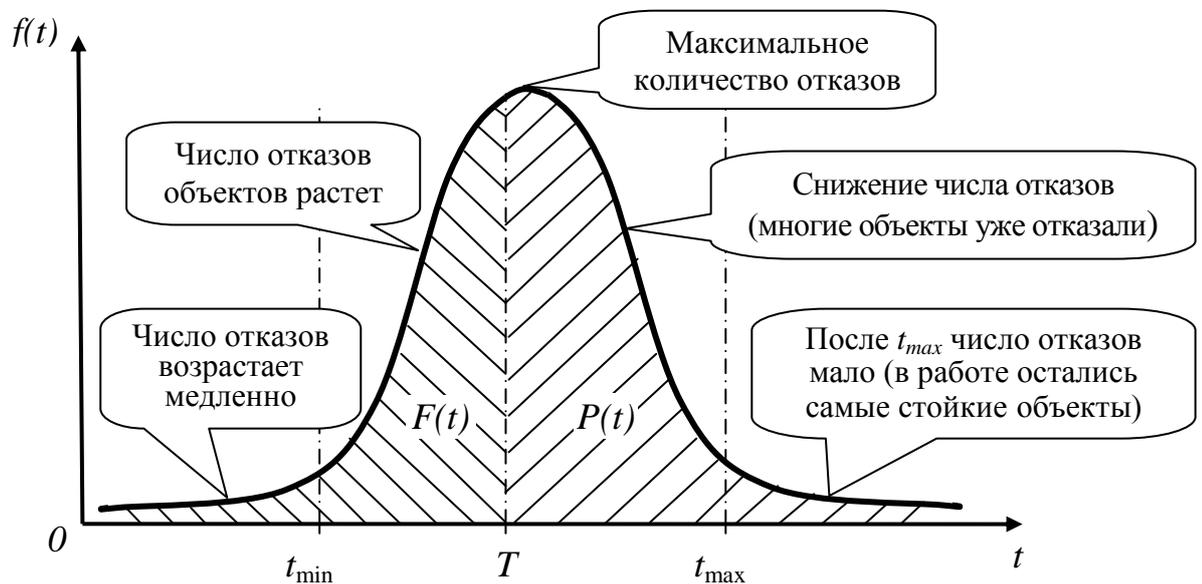


Рис. 1. Плотность вероятности отказа

Наработка до отказа, кроме среднего, оценивается дисперсией D , коэффициентом вариации v , среднеквадратичным отклонением σ .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности отказа, определяемая из условия, что к требуемой наработке t отказа не было.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} . \quad (7)$$

По опытным данным интенсивность определяется:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot m(t)} , \quad (8)$$

где Δn - число отказов на интервале наработки Δt ; $m(t)$ - число изделий не отказавших к наработке Δt .

Гамма-процентная наработка до отказа T_γ – наработка, в течение которой отказа не будет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Для изделий автомобилестроения $\gamma=80-95$, для узлов и агрегатов, влияющих на БД, $\gamma \geq 90\%$.

Определяется T_γ согласно рис. 2. По T_γ определяют время проведения ТО.

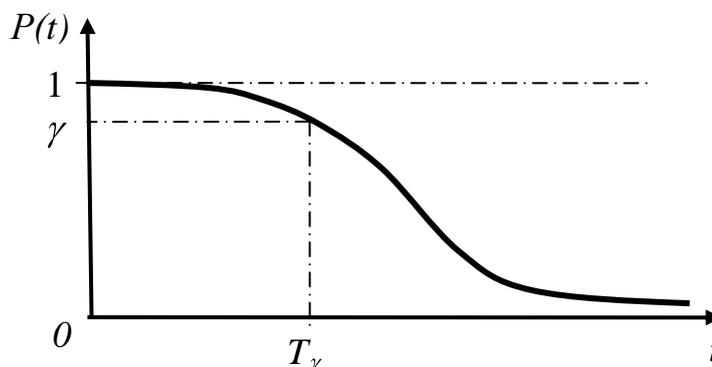


Рис.2. Определение гамма-процентной наработки до отказа

Показатели безотказности восстанавливаемых объектов

Восстанавливаемый элемент после отказа ремонтируется и продолжается его эксплуатация. Схематично работу такого объекта можно изобразить согласно рис. 3.

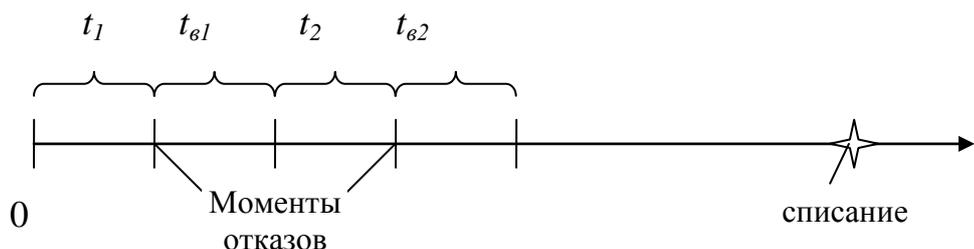


Рис.3. Работа восстанавливаемого объекта

t_{e_i} - время восстановления; t_1 - наработка до отказа; t_2, t_3 - наработка на отказ

Обычно время восстановления много меньше времени наработки объекта между отказами $t \gg t_e$. Если принять время восстановления за ноль, то получаем поток отказов (рис.4).

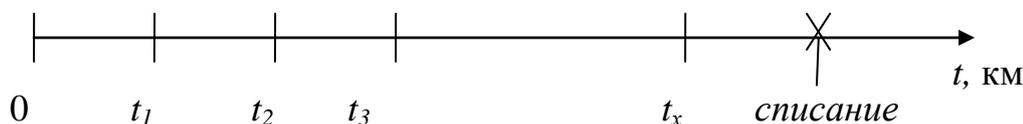


Рис.4. Поток отказов

Для восстанавливаемых объектов применимы показатели безотказности для не восстанавливаемых объектов: $F(t)$; $P(t)$; $f(t)$ и другие.

Для восстанавливаемых объектов чаще используется средняя наработка на отказ, которая определяется из экспериментальных данных:

$$T = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k t_i, \quad (9)$$

где k – число отказов; t_i - наработка между i и $(i+1)$ отказом.

Ведущая функция отказов – накопленное число отказов к наработке t .

$$\Omega(t) = \sum_{i=1}^k F_i(t). \quad (10)$$

Аналитически ведущая функция потока отказов определена не для всех законов распределения.

Для экспоненциального закона распределения

$$\Omega(t) = \frac{t}{T}, \quad (11)$$

где T – средняя наработка на отказ.

Для нормального закона

$$\Omega(t) = \sum_{k=1}^{\infty} F_k(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - k \cdot T}{\sigma_k}\right), \quad (12)$$

где k – число отказов; σ - среднее отклонение; $\Phi(z)$ – нормированная функция для $Z = \frac{t - k \cdot T}{\sigma_k}$.

При достаточно большой наработке и конечной дисперсии для любого закона распределения ведущая функция может быть приблизительно определена:

$$\Omega(t) \approx \frac{t}{T} + \frac{\sigma^2}{2T^2} - \frac{1}{2}. \quad (13)$$

При этом ведущая функция потока отказов должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{t}{T} - 1 \leq \Omega(t) \leq \frac{t}{T}. \quad (14)$$

Ω позволяет определить количество запчастей или время проведения ТО.

Параметр потока отказов $\mu(t)$ - относительное число отказов, приходящееся на единицу времени или наработки.

$$\mu(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt}. \quad (15)$$

На практике часто используется усредненный параметр потока отказов

$$\bar{\mu}(t) = \frac{\Omega(t_2) - \Omega(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (16)$$

Для экспоненциального закона распределения:

$$\mu(t) = \frac{1}{T}. \quad (17)$$

Для нормального закона распределения:

$$\mu(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi k}} \cdot e^{-\frac{t-kT}{2\sigma}}. \quad (18)$$

Показатели ремонтпригодности

Вероятность восстановления $P_B(t_B)$ – вероятность того, что время восстановления объекта до работоспособного состояния не превышает заданного значения.

Процесс восстановления представляет собой Пуассоновский поток, поэтому P_B может быть определена

$$P_B(t_B) = \frac{(\lambda_B t_B)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda_B t_B}, \quad (19)$$

где λ_B – интенсивность восстановления; k – число восстановлений или отказов.

P_B определяется из условия, что в начальный момент времени $t_B=0$ объект был полностью неработоспособен: $t_B = 0 \Rightarrow P_B(0) = 0$.

Среднее время восстановления T_B – математическое ожидание времени восстановления. Из опытных данных T_B определяется:

$$T_B = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k t_{B_i}, \quad (20)$$

где t_{B_i} – время на восстановление после i -го отказа.

Кроме этого T_B оценивается дисперсией D_B , С.К.О. σ_B , коэффициентом вариации v_B .

Интенсивность восстановления $\lambda_B(t_B)$ – условная плотность вероятности восстановления, определяемая при условии, что к данному моменту времени, восстановление объекта до работоспособного состояния завершено не было.

$$\lambda_B(t_B) = \frac{f_B(t_B)}{1 - P_B(t_B)} \quad (21)$$

где f_B – плотность вероятности восстановления.

Гамма-процентное время восстановления $T_{B\gamma}$ – время, к которому восстановление объекта до работоспособного состояния будет завершено с вероятностью γ , выраженной в %. Определение $T_{B\gamma}$ на рис. 5.

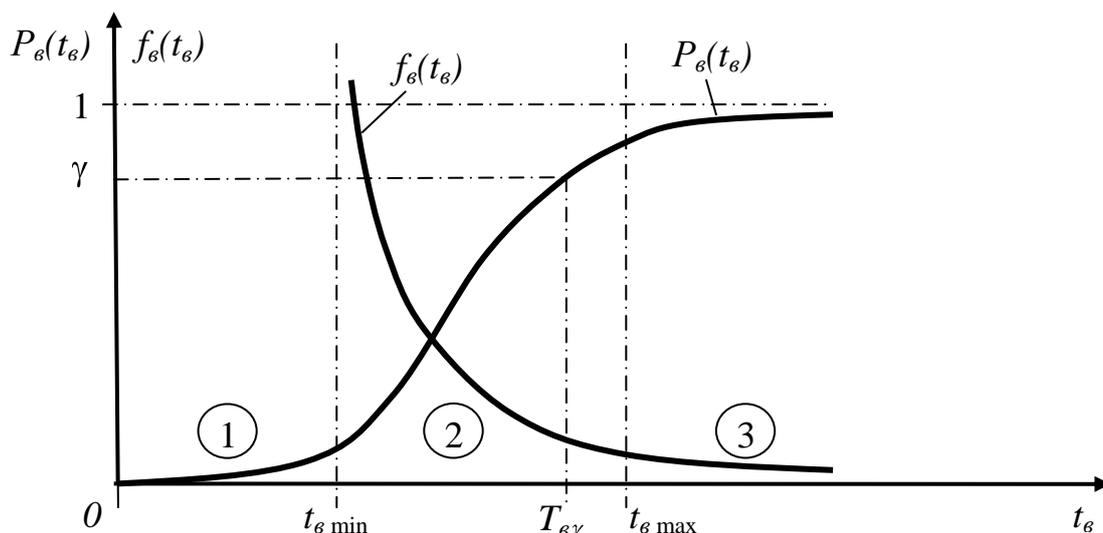


Рис.5. Определение гамма-процентного времени восстановления:

1 – восстановление начинается, но к моменту времени $t_{\epsilon \min}$ не заканчивается; 2 – интервал времени, на котором восстановление завершается; 3 – в основном, восстановление не затягивается дольше $t_{\epsilon \max}$.

Для оценки ремонтпригодности часто используется понятие **трудоемкости восстановления** – трудозатраты, затраченные на восстановление объекта до работоспособного состояния и выраженные в человеко-часах.

Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления. Определяется, как

$$W_B = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \omega_{B_i} \quad (22)$$

где ω_{B_i} – трудоемкость восстановления после i -го отказа.

Показатели долговечности

Средний ресурс T_r – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс $T_{r\gamma}$ – суммарная наработка, по истечении которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в %.

Назначенный ресурс T_{rn} – суммарная наработка, по истечении которой объект должен быть выведен из эксплуатации независимо от его технического состояния.

Средний срок службы T_{cp} – математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентный срок службы $T_{c\gamma}$ – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью γ в %.

Назначенный срок службы T_{cn} – календарный срок эксплуатации, по истечении которого объект должен быть выведен из эксплуатации, независимо от его технического состояния.

Показатели сохраняемости

Средний срок сохранности – математическое ожидание срока сохранности.

Кроме среднего, срок сохранности оценивается D_c ; σ_c ; v_c .

Гамма-процентный срок сохранности – срок хранения, достигаемый объектом с вероятностью γ , выраженной в %.

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность хранения, по истечении которой хранение должно быть прекращено независимо от состояния объекта.

Показатели сохранности являются важными для запчастей, в частности резинотехнических изделий и ГСМ. Срок хранения шин в РФ 3-5 лет.

Комплексные показатели надежности

Коэффициент готовности K_G – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, за исключением плановых периодов простоя, в течение которых эксплуатация не предусмотрена.

Плановый период простоя: ТО, хранение и транспортирование.

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}, \quad (23)$$

где T – средняя наработка на отказ; T_B – среднее время восстановления.

Коэффициент оперативной готовности K_{OG} – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, за исключением планового периода простоя, и, начиная с данного момента времени, объект будет работать безотказно в течение заданной наработки.

$$K_{OG} = K_G \cdot P(t) = \frac{T}{T + T_B} \cdot P(t), \quad (24)$$

где t – наработка, в течении которой объект будет работать безотказно; $P(t)$ – вероятность безотказной работы в течении наработки t .

Коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ – отношение суммарного времени нахождения в работоспособном состоянии объекта за определенный период эксплуатации к суммарному времени нахождения в работоспособном состоянии и простоя, обусловленного проведением ТО и ремонта за тот же период эксплуатации.

$$K_{ТИ} = \frac{t_{paб}}{t_{paб} + t_B + t_{ТО}} = \frac{t_{paб}}{t_{\ominus}}, \quad (25)$$

где t_{\ominus} – время периода эксплуатации; $t_{paб}$ – время работоспособного состояния за время t_{\ominus} ; t_B – время восстановления за время t_{\ominus} .

Коэффициент сохранения эффективности $K_{CЭ}$ – отношение показателя эффективного использования объекта по назначению за определенный период эксплуатации к номинальному показателю эффективности, определенный при условии, что за этот период отказов не было.

Задачи практического занятия 1

1. Автомобиль ГАЗ-3110 имеет следующие наработки между отказами сцепления: 34800 км, 52300 км, 44250 км, 46400 км, 39800 км. Найти число отказов к пробегу 150000 км и удельное число отказов на 10000 км, если наработка на отказ распределена по экспоненциальному закону.
2. Средняя наработка на отказ электрооборудования 5800 км, среднеквадратическое отклонение 4000 км, закон распределения отказов – Вейбулла. Найти границы возможного числа отказов на периоде эксплуатации от 100000 км до 150000 км; найти удельное число отказов на 10000 км пробега.
3. Годовой пробег автомобиля ГАЗ-33073 составил 51300 км, время в работе 2040 часов. За год автомобиль находился в простоях из-за ремонта 155 часов. Через каждые 3500 км проводится ТО в течение 2.5 часов, а каждое четвертое ТО проводится углубленно в течение 8 часов. Определить коэффициент технического использования автомобиля.
4. При эксплуатации автомобиля ГАЗ-3110 получены следующие данные наработки:

Интервал, тыс. км.	0-60	60-120	120-180	180-240	240-300
Сред. наработка, тыс. км	8.5	5.44	4.71	2.84	2.32

Закон распределения наработки – Вейбулла. Среднеквадратическое отклонение составляет 30% от всей наработки на отказ. Определить характер зависимости числа отказов (отказ/10000 км) от наработки в виде графика.

5. Автомобиль ГАЗ-3307 имеет следующие наработки до отказа сцепления: 34800 км, 52300 км, 44250 км, 46400 км, 39800 км. Найти число отказов к пробегу 200000 км и удельное число отказов на 10000 км, если наработка на отказ распределена по закону Вейбулла, среднеквадратическое отклонение 20000 км.
6. Средняя наработка на отказ системы питания автомобиля ГАЗ-322132 7800 км, среднеквадратическое отклонение 3500 км, закон распределения отказов – нормальный. Найти границы возможного числа отказов на периоде эксплуатации от 150000 км до 200000 км; найти удельное число отказов на 1000 км пробега.

Список рекомендуемой литературы

Основная

1. **Гурвич, И.Б.** Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей./ И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
2. **Кузнецов, Е.С.** Техническая эксплуатация автомобилей./ Е.С. Кузнецов – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.
3. **Цхай, Ф.А.** Основы теории эксплуатационной надёжности автомобилей/ Ф.А. Цхай, Л.С. Синельников, Горький, 1980. – 77 с.

Дополнительная

1. **Гнеденко, Б.В.** Математические методы в теории надежности/ Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев – М.: Наука, 1965. – 521 с.
2. **Голинкевич, Т.А.** Прикладная теория надежности/ Т.А. Голинкевич – М.: Высшая школа, 1985. – 166 с.
3. **Шор, Я.Б.** Таблицы для анализа и контроля надежности/ Я.Б. Шор – М.: Высшая школа, 1968. – 341 с.

Практическое занятие 2

по теме 4 «Надежность сложных систем»

Основные положения теории

1. Структурные схемы надежности

Автомобиль и его агрегаты есть сложные системы, любая из которых состоит из множества элементов. Работоспособность любого элемента непосредственно влияет на работоспособность всей системы [3].

Структурная схема надежности (модель надежности) – модель, установленная взаимосвязь между элементами и их влияние на работоспособность всей системы.

Последовательная схема надежности (рис.4.1) – техническая система, для нормального функционирования которой необходимо исправное (работоспособное) состояние всех ее элементов.

Параллельная схема надежности (рис.4.1) – если в случае отказа одного элемента система остается работоспособной (другой элемент выполняет функции отказавшего).

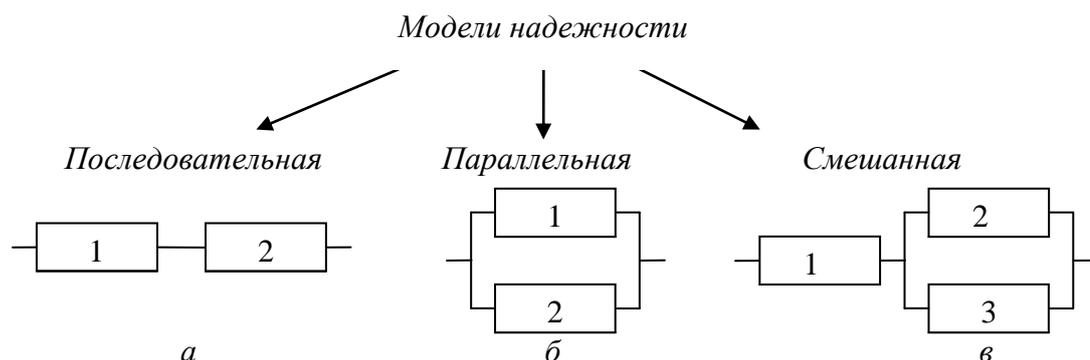


Рис.4.1. Структурные схемы надежности

Для определения структурной схемы надежности необходимо правильно определить функциональное назначение каждого элемента и влияние на работоспособность всей системы.

Для примера рассмотрим системы, состоящие из двух водопроводных кранов (рис. 4.2).

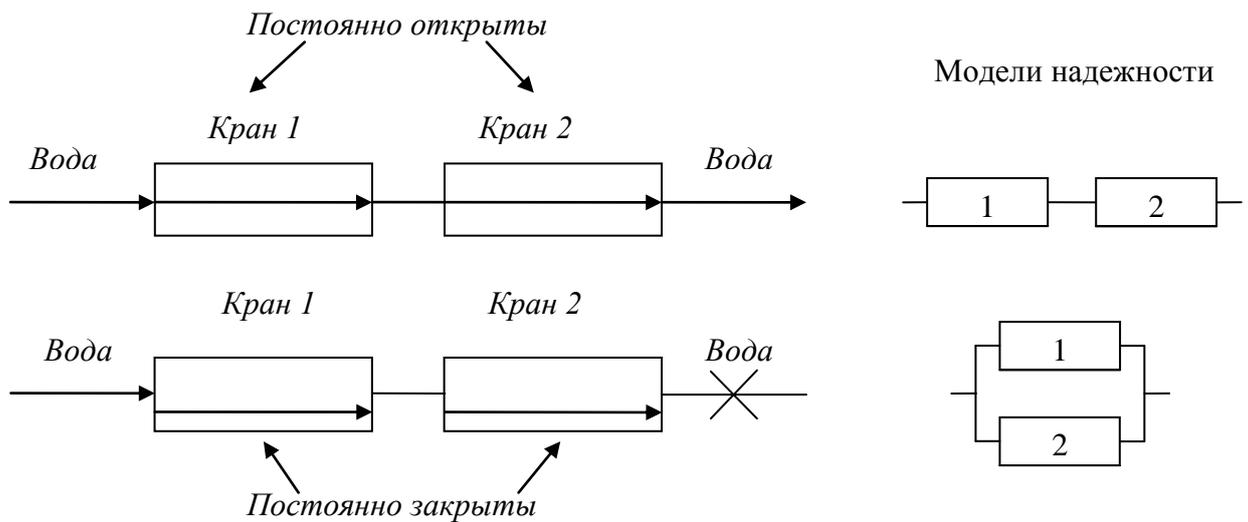


Рис.4.2. Схемы систем и модели надежности

2. Структурная схема надежности системы с последовательным соединением элементов

Модель надежности такой системы – рис. 4.1,а. Вероятность безотказной работы любого элемента к заданной наработке t составляет P_i , тогда вероятность безотказной работы всей системы:

$$P = P_1 \cdot P_2 \Rightarrow P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где n – число элементов.

Вероятность отказа

$$F = 1 - P = 1 - P_1 \cdot P_2 = 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2);$$

$$F = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i). \quad (2)$$

Примером последовательной системы является автомобиль, если его элементами считают двигатель, трансмиссию, рулевое управление и т.д.

3. Структурная схема надежности системы с параллельным соединением элементов

Пример такой системы на рис. 4.1,б.

Вероятность отказа системы с параллельным соединением элементов

$$F = F_1 \cdot F_2 \Rightarrow F = \prod_{i=1}^n F_i. \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы системы:

$$P = 1 - F = 1 - F_1 \cdot F_2 = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2);$$

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i). \quad (49)$$

На практике часто встречается система с частичным резервированием, в которой параллельно соединены более двух элементов (рис.4.3).

Такая система остается работоспособной даже при выходе из строя нескольких элементов.

Надежность такой системы:

$$P = \sum_{k=j}^n C_n^k \cdot P_1^k \cdot F_1^{n-k}, \quad (5)$$

где C_n^k - число сочетаний;

P_1^k - вероятность безотказной работы любого элемента;

F_1^{n-k} - вероятность отказа любого элемента;

n - число элементов;

j - число работоспособных элементов, при котором система остается работоспособной.

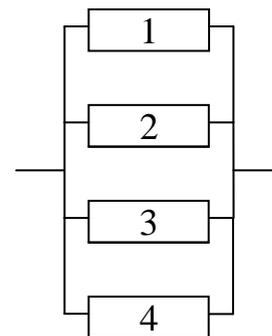


Рис.4.3. Система с частичным резервированием

4. Резервирование

Резервирование – это способ обеспечения надежности путем использования дополнительных средств или возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

В теории резервирования используют понятия:

➤ **Основной элемент** – элемент системы, способный выполнять требуемые функции без использования резерва.

➤ **Резервируемый элемент** – элемент, для которого в системе предусмотрено резервирование.

➤ **Резервный элемент** – элемент системы, выполняющий функции основного в случае отказа последнего.

Виды резервных элементов:

➤ **Нагруженный резерв** – резервный элемент или группа элементов, работающих в режиме основного (2 контура торможения).

➤ **Ненагруженный резерв** – резервный элемент или группа элементов, остающихся в ненагруженном состоянии до момента отказа основного элемента (запасное колесо).

Рассмотрим основные виды резервирования (рис.4.4).

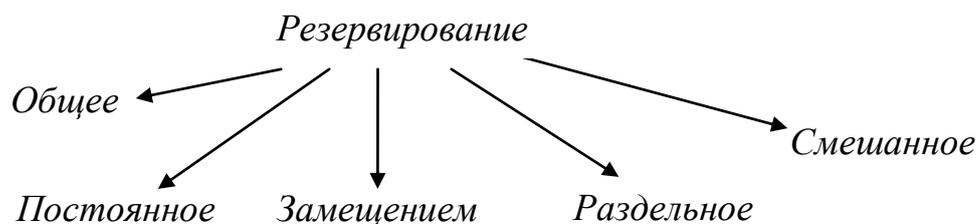


Рис.4.4. Виды резервирования

Общее – резервирование, при котором резервируется весь объект целиком (тормозная система – главная резервируется стояночной).

Постоянное – резервирование, при котором все резервные элементы находятся в нагруженном состоянии (сдвоенные задние колеса на грузовиках).

Замещением – резервирование, при котором резервный элемент выполняет функции основного только после отказа последнего (запасное колесо).

Раздельное – резервирование, при котором резервируются отдельные детали или группы деталей в системе (трансмиссия 4x4).

Смешанное – резервирование, при котором сочетаются различные виды резервирования.

Задачи практического занятия 2

1. Техническая система состоит из $n=4$ элементов, надежность которых $P_1=0.97$, $P_2=0.79$, $P_3=0.95$, $P_4=0.56$. Требуемое значение надежности системы 0.73. Выход из строя одного элемента приводит к выходу из строя всей системы. Перераспределить нормы надежности элементов, чтобы надежность всей системы была равной 0.73.
2. Техническая система состоит из $n=3$ элементов, надежность которых $P_1=0.96$, $P_2=0.87$, $P_3=0.63$. Требуемое значение надежности системы 0.72. Выход из строя одного элемента приводит к выходу из строя всей системы. Перераспределить нормы надежности элементов, чтобы надежность всей системы была равной 0.72.
3. Зажигание смеси в каждом из четырех цилиндров двигателя обеспечивается свечой. Отказ одной свечи приводит к частичной потере работоспособности двигателя. Определить надежность системы при работающих двух любых свечах, если вероятность безотказной работы каждой свечи $P=0.9$

Рекомендуемая литература.

Основная

1. **Гурвич, И.Б.** Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей./ И.Б. Гурвич, П.Э. Сыркин – М.: Транспорт, 1984. – 141 с.
2. **Кузнецов, Е.С.** Техническая эксплуатация автомобилей./ Е.С. Кузнецов – М.: Транспорт, 1991. – 413 с.

Дополнительная

1. **Гнеденко, Б.В.** Математические методы в теории надежности/ Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев – М.: Наука, 1965. – 521 с.
2. **Кугель, Р.В.** Надежность машин массового производства/ Р.В. Кугель – М.: Машиностроение, 1981. – 307 с.