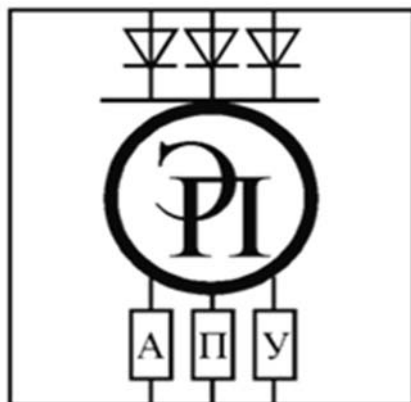


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
дневной формы обучения*



Могилев 2024

УДК 62-83
ББК 31.291
Н17

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «14» декабря 2023 г.,
протокол № 5

Составитель А. С. Коваль

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях рассмотрены основные термины и показатели надёжности невосстанавливаемых и восстанавливаемых технических объектов.

Учебное издание

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

1 Общие положения	4
2 Практическое занятие № 1. Непосредственный расчет вероятностей.....	9
3 Практическое занятие № 2. Законы распределения вероятностей отказов	11
4 Практическое занятие № 3. Количественные показатели безотказности невосстанавливаемых объектов	13
5 Практическое занятие № 4. Количественные показатели безотказности восстанавливаемых объектов	16
6 Практическое занятие № 5. Количественные показатели долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости	20
7 Практическое занятие № 6. Расчет вероятности безотказной работы по структурным схемам	23
8 Практическое занятие № 7. Расчет вероятности безотказной работы по структурным схемам с использованием алгебры логики	25
9 Практическое занятие № 8. Коэффициентный метод расчета вероятности безотказной работы устройств автоэлектроники	29
Список литературы	31

1 Общие положения

В теории надежности все термины даются применительно к техническим объектам. Под объектом понимаем предмет определенного целевого назначения, рассматриваемый в периоды проектирования, производства, эксплуатации, исследований и испытаний на надёжность. Объектами могут быть изделия, системы и их элементы, в частности, приборы и их составные части. Первичным по отношению к понятию «надёжность» является понятие «качество» объекта. *Качество* объекта – совокупность свойств и признаков, определяющих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением, и выражающая его специфику и отличие от других объектов. Но, т. к. этап применения (эксплуатации) объекта охватывает определенный, как правило, длительный период времени, под влиянием различных факторов может произойти изменение уровня свойств, определяющих качество объекта и эффективность его функционирования, под которой понимается выгодность целевого обмена ресурсов (материальных, энергетических, трудовых, информационных) на конечный результат (для технологических систем – готовую продукцию). Следует иметь в виду, что изменение показателей качества объекта во времени может быть абсолютным и относительным. *Абсолютное изменение качества* связано с различными повреждающими процессами, воздействующими на объект при эксплуатации и изменяющими свойства и состояние материалов, из которых изготовлен объект или его составные части; за счет этого происходит прогрессивное снижение показателей качества объекта и его физическое старение (физический износ). *Относительное изменение качества* объекта связано с появлением новых аналогичных объектов с более совершенными характеристиками, в связи с чем показатели данного объекта становятся ниже среднего уровня в совокупности объектов аналогичного целевого назначения, хотя в абсолютных значениях они могут не изменяться (моральный износ). Наука о надёжности изучает только абсолютное изменение показателей качества объектов, связанное с протеканием различных повреждающих процессов. *Предметом науки о надёжности* является изучение закономерностей изменения показателей качества объектов во времени и разработка методов, позволяющих с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить необходимую продолжительность и эффективность их работы. Теория надёжности тесно связана с прикладной математикой, используя её методы для решения своих задач и для точной формулировки своих понятий. В то же время это одна из инженерных дисциплин, поскольку основными для неё являются те реальные задачи, в которых главное – решение практических задач, а не разработка методов. Основная задача теории надежности на этапе технического проектирования – помочь разработчику принять обоснованное решение, касающееся выбора структуры системы, необходимости использования и величине вводимой избыточности, построения оптимальной системы контроля и, в конечном счете, нахождения рационального решения двойственной задачи: при заданных характеристиках создать систему с минимальной стоимостью, при заданной стоимости добиться наилучших технических пара-

метров, в том числе и показателей надежности. Основная задача теории надежности на стадии производства – оценка надежности сложного комплекса по результатам испытаний его компонентов, разработка рациональных планов контроля надежности. Основная задача теории надежности на стадии эксплуатации – изучение зависимости показателей надежности от режимов использования, прогнозирование отказов, оценка остаточного ресурса управления режимами эксплуатации. Одна из важных задач теории надежности – разработка принципов конструирования сложной аппаратуры, которые позволили бы получать устройства, способные сохранять работоспособность даже при выходе из строя части составляющих её элементов. Актуальной стала проблема надёжности программного обеспечения. Традиционные концепции теории надёжности в этом случае непригодны. Проблема качества компьютерных программ представляется актуальной, поскольку всё больше современных систем зависит от них.

Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования (по ГОСТ 27.002–89). Сопоставляя понятия «качества продукции» и «надежности», регламентированные ГОСТ, можно сказать, что надежность – комплексный показатель качества, а для определенной категории изделий является определяющим показателем качества. Поскольку надежность – свойство, а всякое свойство относительно и не существует само по себе, можно сказать, что надежность объекта оценивается лишь в конкретных условиях эксплуатации.

В соответствии с международным стандартом ИСО 8402 под надежностью понимается собирательный термин, используемый для обозначения и описания характеристики готовности и влияющих на нее факторов: безотказности, ремонтпригодности и обеспечения технического обслуживания и ремонта, т. е. под надежностью объекта понимается его способность сохранять качество при определенных условиях эксплуатации и это понятие надежности связано с теми свойствами, которые были у изделия перед эксплуатацией (или должны были быть). Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации включает безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость в отдельности или в определенных сочетаниях. Для конкретных объектов и условий их эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки (по ГОСТ 27.002–89). Из определения безотказности следует, что данное свойство отражает основное содержание надежности, т. к. главное назначение любого прибора – исправно выполнять предназначенные ему функции в течение определенного промежутка времени.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта (по ГОСТ 27.002–89).

Безотказность и долговечность – это свойства изделия сохранять работоспособность. Различие между ними в том, что безотказность предполагает непрерывное сохранение работоспособности, а долговечность – длительное с возможными перерывами для ремонта. Для некоторых изделий понятия безотказности и долговечности могут совпадать. Различие между ними для невозстанавливаемых изделий не принципиально и связано с концепцией разделения отказов на внезапные и постепенные, исходя из которой внезапные отказы характеризуют безотказность, а постепенные (износные) – долговечность.

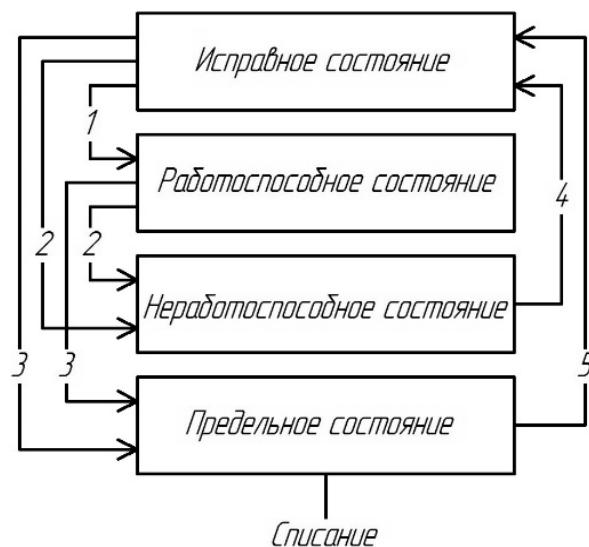
Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта (по ГОСТ 27.002–89).

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортировки (по ГОСТ 27.002–89). Из этого определения следует, что понятия «надежность» и «сохраняемость» тождественны. Их отличие лишь в условиях эксплуатации. Различают исправное и работоспособное состояние объекта.

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации (по ГОСТ 27.002–89).

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. С понятием долговечности связан термин *предельное состояние* – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна.

Схема основных состояний объекта приведена на рисунке 1.1.



1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход объекта в предельное состояние из-за неустранимого нарушения требований безопасности, снижения эффективности эксплуатации, морального старения и других факторов; 4 – восстановление; 5 – ремонт

Рисунок 1.1 – Схема основных состояний и событий

Различие между понятиями исправности и работоспособности связано с различием понятий дефекта, повреждения и отказа.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям (по ГОСТ 15467–79).

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния (по ГОСТ 27.002–89).

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (по ГОСТ 27.002–89).

Таким образом, отказом называется событие, после возникновения которого характеристики технического объекта (параметры) выходят за допустимые пределы.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструктивной (проектной) документации (по ГОСТ 27.002–89).

В зависимости от признаков классификации отмечаются различные виды отказов.

1 По характеру изменения основного параметра до момента возникновения – отказы делятся на внезапные, характеризующиеся выходом параметра за установленные пределы в виде скачкообразного изменения значения, и постепенные, возникающие в результате постепенного («плавного») изменения одного или нескольких параметров.

2 В зависимости от возможности последующего использования объекта после возникновения его отказа, отказы делятся на полные, после возникновения которых использование объекта по назначению невозможно до восстановления его работоспособности, и частные, после возникновения которых использование объекта по назначению хотя и возможно, но при этом значение одного или нескольких основных параметров находятся вне допустимых пределов.

3 С точки зрения связи между отказами элемента они разделяются на независимые (не обусловленные другими отказами) и зависимые (обусловленные другими отказами).

В зависимости от причины возникновения отказа, они разделяются на:

- конструктивные (возникающие по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования);
- производственные (возникающие по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта);
- эксплуатационные (возникающие по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации);
- деградационные (обусловленные естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации).

Определим объекты восстанавливаемые и невосстанавливаемые, поскольку часть показателей надежности для них различается.

Восстановление – процесс перевода объекта в работоспособное состояние из неработоспособного состояния (по ГОСТ 27.002–89).

Восстанавливаемый объект – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации (по ГОСТ 27.002–89).

Один и тот же объект в зависимости от особенностей эксплуатации может быть отнесен к восстанавливаемым или невосстанавливаемым. Полупроводниковые приборы являются примером невосстанавливаемого объекта. Радиоэлектронная аппаратура, в которой используются эти приборы, часто бывает восстанавливаемой.

В отличие от понятий «восстанавливаемый объект» и «невосстанавливаемый объект», которые относятся к условиям восстановления работоспособности объектов в конкретной ситуации, существует понятие «ремонтируемый объект», характеризующее приспособленность объектов к проведению ремонтов и технического обслуживания.

Ремонтируемый объект – объект, ремонт которого возможен и предусмотрен нормативно-технической, ремонтной и (или) конструкторской (проектной) документацией (по ГОСТ 27.002–89).

В ряде случаев понятия восстанавливаемого объекта и ремонтируемого объекта совпадают.

Ремонт – комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей (по ГОСТ 18322–78).

В настоящее время, помимо общепринятых составляющих надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости) рассматриваются эффективность, живучесть, безопасность и защищенность.

Эффективность касается систем, для которых нельзя сформулировать критерий отказа в форме «все или ничего». Показатели эффективности характеризуют способность системы выполнять свои основные функции с пониженным уровнем производительности, качества, скорости и т. п., т. е. с меньшей эффективностью.

Живучесть – свойство системы противостоять крупным возмущениям режима, не допуская их цепочечного развития и массового отключения потребителей, не предусмотренного алгоритмом работы противоаварийной автоматики. Живучесть характеризует способность системы «выдержать» внешнее воздействие, например, грубые непредсказуемые ошибки оператора, природные катастрофы (землетрясения, ураганы, наводнения). Анализ живучести обычно сводится к анализу «узких мест», т. е. рассматривается ситуация, когда указанное возмущение оказывается на наиболее критичный элемент системы.

Безопасность – свойство объекта не создавать опасности для людей и окружающей среды во всех возможных режимах работы и аварийных ситуациях. Обычно безопасность характеризуется вероятностными показателями, аналогичными тем, что используются при анализе надежности.

Защищенность системы рассматривается обычно совместно с анализом надежности и безопасности. Действительно, многие системы должны работать не только надежно, но и быть защищены от несанкционированного доступа.

Многие оборонные, банковские и другие телекоммуникационные системы, имеющие дело со строго конфиденциальной информацией, немыслимы без обеспечения их защищенности.

Для количественной характеристики надежности используют различные показатели. *Показателем надежности* называют количественную характеристику одного или нескольких свойств, определяющих надежность объекта. *Единичным показателем надежности* называется показатель надежности, характеризующий одно из свойств, определяющих надежность машины. Соответственно, *комплексным показателем надежности* называется показатель, характеризующий несколько свойств, определяющих надежность объекта.

Показатели надежности могут быть определены расчетными методами, по данным испытаний или данным эксплуатации. Соответственно, различают расчетный показатель надежности, экспериментальный показатель надежности и эксплуатационный показатель надежности. Применяется также термин «экстраполированный показатель надежности» – показатель, точечная или интервальная оценка которого определяется на основании расчетов, испытаний и (или) эксплуатационных данных путем экстраполяции на другую продолжительность эксплуатации и другие условия эксплуатации. На стадии проектирования показатели надежности трактуют как характеристики вероятностных или полув вероятностных математических моделей создаваемых объектов. На стадиях экспериментальной отработки, испытаний и эксплуатации роль показателей надежности выполняют статистические оценки соответствующих вероятностных характеристик. В целях единообразия все показатели надежности определяют как вероятностные характеристики. Это дает возможность прогнозировать значения этих показателей на стадии проектирования.

2 Практическое занятие № 1. Непосредственный расчет вероятностей

Случайное событие – это всякий факт, который в результате опыта может произойти или не произойти. Чтобы качественно сравнивать между собой события по степени их возможности проявления, нужно с каждым событием связать определенное число (его вероятность проявления), которое тем больше, чем более возможно событие. Вероятность события – это численная мера степени объективности возможности этого события в данном случайном процессе. Вероятность события обозначается $P(A)$. Вычисляется статистически, как $P(A) = m/n$ (m – число случаев, при которых событие A имеет место; n – общее число событий). Достоверным является событие A , которое в результате опыта непременно должно произойти. В этом случае $P(A) = 1$. Невозможным является событие A , которое в результате опыта не может произойти. В этом случае $P(A) = 0$. Очевидно, что вероятность любого случайного события заключена между 0 и 1.

При одновременном изучении двух или нескольких событий различают события совместные и несовместные. События называются *несовместными*,

если никакие два из них не могут появиться вместе, и, наоборот, события называются совместными, если они могут произойти одновременно. Пример совместного события – одновременный отказ двух и более элементов в один и тот же момент времени в относительно простой последовательной схеме. Если вероятность одного события не изменяется от того, произошло или не произошло другое событие, то такие события называются *независимыми*, и наоборот.

Пример 1 – В ящике 5 белых и 10 черных шаров. Из ящика вынимают наугад один шар. Какова вероятность, что этот шар – белый?

Ответ: $P = 5/15 = 0,33$.

Пример 2 – В ящике 5 белых и 10 черных шаров. Из ящика вынимают один шар. Этот шар – белый. Затем из ящика берут еще один шар. Какова вероятность, что этот шар тоже белый?

Ответ: $P = 5 - 1/15 - 1 = 0,28$.

Пример 3 – Какова вероятность достать 5 белых шаров из ящика, в котором лежит 12 белых и 7 черных?

Решение

Общее число возможных случаев N равно числу способов извлекать 5 шаров из 19, т. е. числу сочетаний из 19 предметов по 5.

$$N = C_{19}^5 = 19!/5!14!$$

Число благоприятных случаев n равно числу способов извлекать 5 белых шаров из 12: $n = 12!/5!7!$

Тогда искомая вероятность $P = n/N = 22/323 = 0,07$.

Пример 4 – В ящике a белых шаров и b черных шаров. Из ящика вынимают сразу 5 шаров. Какова вероятность P того, что два из них будут белыми, а три черными?

Решение

Общее число N возможных случаев достать 5 шаров равно числу способов извлекать 5 шаров из $(a + b)$, т. е. равно числу сочетаний из $(a + b)$ предметов по 5: $N = C_{a+b}^5 = (a + b)!/5!$

Число m возможных случаев извлечь 5 шаров, чтобы в них было два белых и три черных, определяется: $m = C_a^2 C_b^3 = a!/2!(a - 2)! \cdot b!/3!(b - 3)!$

Тогда искомая вероятность: $P = m/N$.

Пример 5 (для самостоятельной работы) – Имеется два ящика: в первом a белых и b черных шаров; во втором c белых и d черных. Из каждого ящика вынимается по шару. Найти вероятность того, что оба шара будут белыми.

3 Практическое занятие № 2. Законы распределения вероятностей отказов

Основные законы распределения вероятностей.

Экспоненциальное распределение. Основные показатели надежности (вероятность безотказной работы, плотность вероятностей, наработка на отказ T_{cp}) могут быть оценены исходя из следующих зависимостей:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t};$$

$$T_{cp} = 1 / \lambda; \quad \lambda = \text{const},$$

где λ – параметр экспоненциального распределения.

Нормальное распределение

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

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

где m_x – математическое ожидание;

σ – среднеквадратическое отклонение.

Вероятность того, что случайная величина примет значения принадлежащие интервалу (a, b) , описывается выражением

$$P(a, b) = \Phi\left(\frac{b - m_x}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - m_x}{\sigma}\right) = \Phi(z_1) - \Phi(z_2),$$

где $\Phi(z)$ – центрированная функция Лапласа (функция протабулирована и дана,

например, в [6]), $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$.

Распределение Вейбулла.

Плотность распределения

$$f(x) = k \lambda_0 x^{k-1} e^{-\lambda_0 x^k}.$$

Функция распределения

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda_0 x^k},$$

где λ_0 – параметр, определяющий масштаб;

k – параметр асимметрии распределения Вейбулла.

Пример 1 – Определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку до отказа электрического двигателя малой мощности типа ДС-1 для времени t_i , равном 8000, 10000 и 12000 ч, если интенсивность отказов

$\lambda = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Закон распределения отказов экспоненциальный.

Решение

При экспоненциальном законе распределения справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} P(t) = e^{-\lambda t}; & f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \\ T_{cp} = 1 / \lambda; & \lambda = \text{const.} \end{cases}$$

Отсюда

$$T_{cp} = 1 / \lambda = 10^4 / 0,15 = 6,66 \cdot 10^4 \text{ ч};$$

$$P(8000) = \exp\left[-\frac{8000}{6,66 \cdot 10^4}\right] = e^{-0,12} = 0,89;$$

$$P(10000) = \exp\left[-\frac{10000}{6,66 \cdot 10^4}\right] = e^{-0,15} = 0,86;$$

$$P(12000) = \exp\left[-\frac{12000}{6,66 \cdot 10^4}\right] = e^{-0,18} = 0,84.$$

Пример 2 – Отказы гироскопического устройства на шарикоподшипниках подчинены закону распределения Вейбулла с параметрами $k = 1,5$ и $\lambda_0 = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, время его работы $t = 100 \text{ ч}$. Определить показатели надежности такого устройства.

Решение

При законе распределения Вейбулла, справедливы следующие отношения:

$$\begin{cases} P(t) = e^{-\lambda_0 t^k}; \\ a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}; \\ Q(t) = 1 - P(t); \\ \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1}; \\ T_{cp} = \frac{\Gamma(1/k + 1)}{\lambda_0^{1/k}}, \end{cases} \quad (3.1)$$

где $\Gamma(1/k + 1)$ – гамма-функция, приведенная в [1] для значений $(1/k + 1)$.

В соответствии с (3.1)

$$P(100) = e^{-10^{-4} \cdot 100^{1,5}} = 0,9;$$

$$a(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{1,5-1} \cdot 0,9 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda(100) = a(100) / P(100) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$T_{cp} = \frac{\Gamma(1/k+1)}{\lambda_0^{1/k}}.$$

Найдем $x = (1/k+1) = 1,67$, тогда $\Gamma(x) = 0,9033$. Отсюда

$$T_{cp} = 0,9033 / (10^{-4})^{1/1,5} = 418 \text{ ч.}$$

Пример 3 (для самостоятельной работы) – Отказы подшипникового узла асинхронного двигателя подчиняются распределению Вейбулла с параметрами асимметрии распределения $k = 1,5$ и параметром масштаба $n = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Определить вероятность отказа и вероятность безотказной работы подшипникового узла для времени t , равном 500, 1000 и 2000 ч.

4 Практическое занятие № 3. Количественные показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

К показателям безотказности невосстанавливаемых объектов относятся: вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов, частота отказов.

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает.

Вероятность безотказной работы рассматривается в предположении, что в начальный момент времени объект был работоспособен.

Статически $P^*(t)$ определяется как отношение числа объектов $N(t)$, безотказно проработавших до момента времени t , к числу объектов исправных в начальный момент времени $N(0)$:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)}.$$

Безотказность работы объекта противоположна событию-отказу. Статистически вероятность отказа определяется как отношение числа объектов $n(t)$, отказавших к моменту времени t , к числу объектов, исправных в начальный момент времени $t = 0$.

$$Q^*(t) = \frac{n(t)}{N(0)}.$$

Плотность распределения времени безотказной работы $f(t)$ определяет частоту отказов.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt}.$$

Статистически частота отказов определяется отношением числа отказов в интервале времени $[t, t + \Delta t]$ к произведению числа исправных объектов в начальный момент времени $t = 0$ на длительность интервала времени Δt .

$$f^*(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(0) \cdot \Delta t}.$$

Интенсивность отказов – это отношение частоты отказов к вероятности безотказной работы:

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

Статистически $\lambda(t)$ определяется как отношение числа отказов в интервале $[t, t + \Delta t]$ к произведению среднего числа исправных объектов на интервале времени $[t, t + \Delta t]$ на длительность интервала времени:

$$\lambda^*(t) = \frac{(t + \Delta t) - n(t)}{N_{cp}(\Delta t) \cdot \Delta t},$$

где $N_{cp}(\Delta t)$ – среднее число исправно работающих объектов на интервале $[t, t + \Delta t]$.

Отличие интенсивности отказов $\lambda(t)$ от частоты отказов $f(t)$ в том, что в первом случае расчёт ведётся относительно числа исправных приборов на начало рассматриваемого интервала времени t , а во втором случае – на начальный момент времени $t = 0$.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Вероятностное определение

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Статистическое определение средней наработки до отказа:

$$T_{cp}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_i}{N},$$

где $\sum_{i=1}^{N(0)} t_i$ – сумма наработок на отказ всех наблюдаемых объектов $N(0)$.

Средняя наработка до отказа является естественным показателем надёжности.

Пример 1 – На испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За 3000 ч отказало 100 ламп. Определить $P^*(3000)$, $Q^*(3000)$.

Решение

В данном случае $N_0 = 1000$, $N_0 - n(3000) = 900$.

Определяем

$$P^*(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{900}{1000} = 0,9;$$

$$Q^*(3000) = 100 / 1000 = 0,1.$$

Пример 2 – Проводятся ресурсные испытания 400 машин. Через 3000 ч работы отказали 200 машин. Испытания продолжались и через 100 ч отказали еще 100 машин.

Определить $P^*(3000)$, $Q^*(3000)$, $P^*(3100)$, $Q^*(3100)$, $P^*(3050)$, $\lambda^*(3050)$, $a^*(3050)$.

Решение

$$P^*(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5;$$

$$Q^*(3000) = 200 / 400 = 0,5;$$

$$P^*(3100) = (400 - 300) / 400 = 0,25;$$

$$Q^*(3100) = 0,75.$$

Среднее число исправно работающих машин в интервале от 3000 до 3100 ч:

$$N_{cp} = (N_i - N_{i+1}) / 2 = (200 + 100) / 2 = 150.$$

Число отказавших машин за 3050 ч равно

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250,$$

откуда $P^*(3050) = (400 - 250) / 400 = 0,375$.

Частота и интенсивность отказов в интервале (3000, 3100) определяется:

$$a^*(3050) = 100 / (100 \cdot 400) = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda^*(3050) = 100 / (100 \cdot 150) = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Пример 3 (для самостоятельной работы) – Определить вероятность безотказной работы и среднюю наработку на отказ электродвигателя для времени работы t , равном 8000, 10000 и 12000 ч, если интенсивность отказов $\lambda^* = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

5 Практическое занятие № 4. Количественные показатели безотказности восстанавливаемых объектов

Безотказность восстанавливаемого объекта характеризуют *параметр потока отказов* и *наработка на отказ*.

Определение параметра потока отказов осуществляется на основе функции восстановления $H(t)$ – среднего числа отказов $m(t)$ одного экземпляра оборудования за наработку t :

$$H(t) = M(m(t)).$$

Для опытного определения $H(t)$ наблюдают за N экземплярами однотипного оборудования и фиксируют число отказов каждого из них в течение наработки t (рисунок 5.1).

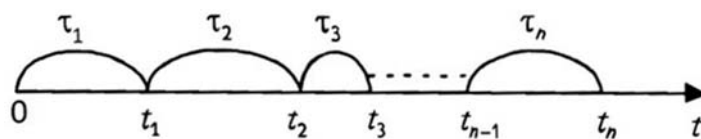


Рисунок 5.1 – Модель процесса восстановления

Оценка среднего числа отказов, приходящихся на один экземпляр рассматриваемого оборудования за наработку t , определяется следующим образом:

$$\bar{m}(t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N m_i(t),$$

где $m_i(t)$ – число отказов i -го экземпляра оборудования за наработку t .

По объединенному процессу восстановления, полученному в результате наложения N процессов конкретных экземпляров оборудования, можно графически представить функцию среднего числа отказов одного экземпляра оборудования за время t (рисунок 5.2). Зависимость $\bar{m}(t)$ представляет собой ступенчатую линию, величина $\bar{m}(t)$ сохраняет постоянное значение в промежутке между отказами отдельных экземпляров оборудования и возрастает скачком на $\frac{1}{N}$ в момент очередного отказа. Чем большее число экземпляров однотипного оборудования будет поставлено под наблюдение, тем меньше

будет интервал наработки Δt между соседними отказами и меньше окажется скачок $\frac{1}{N}$. В пределе при $N \rightarrow \infty$ ступенчатая линия стремится к некоторой непрерывной и плавной кривой $H(t)$, которая и является ведущей функцией процесса восстановления, т. е.

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \frac{m_i(t)}{N}.$$

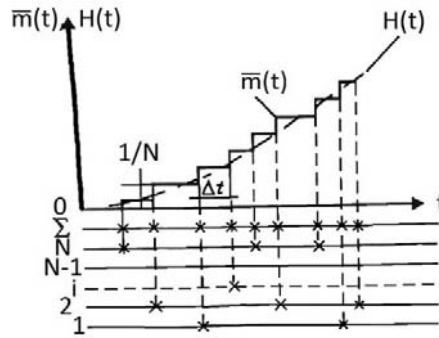


Рисунок 5.2 – Построение функции восстановления

По функции восстановления определяется параметр потока отказов оборудования

$$\omega(t) = \frac{dtH(t)}{dt},$$

который характеризует скорость нарастания среднего числа отказов при различных значениях наработки.

Параметр потока отказов оценивается по статическим данным с помощью выражения, при условии, что отказавшие образцы заменяются исправными или отремонтированными:

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t},$$

где Δm — число отказов N объектов за время Δt .

Статистически наработка на отказ T_0 определяется как среднее арифметическое реализаций времени безотказной работы объектов от момента окончания $(k-1)$ -го восстановления до момента наступления k -го отказа.

$$T_0^* = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k t_{ij}}{\sum_{j=1}^m K_j},$$

где t_{ij} — наработка между соседними отказами j -го образца аппаратуры;

k – число отказов j -го образца аппаратуры;

m – число наблюдаемых образцов.

Пример 1 – Отказы 100 восстанавливаемых объектов распределились следующим образом (таблица 5.1). Определить параметр потока отказов $\omega^*(t)$.

Таблица 5.1 – Распределение отказов

$\Delta t, \text{ч}$	0...200	200...400	400...600	600...800	800...1000	1000... 1200	1200... 1400	1400... 1600	1600... 1800
Δm	24	20	20	22	24	26	28	30	30

Решение

Параметр потока отказов определяется по формуле

$$\omega^*(t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t}.$$

На первом временном интервале $\omega^*(\Delta t) = \frac{24}{100 \cdot 200} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

На втором временном интервале $\omega^*(\Delta t) = \frac{20}{100 \cdot 200} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

На третьем временном интервале $\omega^*(\Delta t) = \frac{20}{100 \cdot 200} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ и т. д.

Результаты расчета сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета параметра отказов

$t, \text{ч}$	$\omega^*(\Delta t), 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$
0	1,2
200	1,0
400	1,0
600	1,1
800	1,2
1000	1,3
1200	1,4
1400	1,5
1600	1,6

Пример 2 – При испытании 200 восстанавливаемых изделий было получено одинаковое число отказов $\Delta m = 14$ за одинаковые промежутки времени $\Delta t = 100 \text{ ч}$. Рассчитать показатели безотказности $\omega^*(t)$, вероятность безотказной работы $P(t)$, вероятность отказа $Q(t)$, среднюю наработку на отказ T .

Решение

Так как при испытании было получено одинаковое число отказов за одинаковые промежутки времени, то параметр потока отказов (см. пример 1) является постоянной величиной и поток отказов является простейшим, для которого справедливо экспоненциальное распределение:

1) вероятность безотказной работы $P(t) = e^{-\lambda t}$;

2) вероятность отказа $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$;

3) средняя наработка на отказ $T = 1 / \lambda$.

Здесь $\omega^*(t) = \lambda(t)$.

Результаты расчета представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчета к примеру 2

$\Delta t, \text{ч}$	$\omega^*(\Delta t), 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$	$P(t)$	$Q(t)$
0	7	1	0
100	7	0,93	0,07
200	7	0,87	0,13
300	7	0,81	0,19
400	7	0,75	0,25
500	7	0,71	0,29
600	7	0,66	0,34
700	7	0,61	0,39
800	7	0,57	0,43

Средняя наработка на отказ $T = 1 / 7 \cdot 10^{-4} = 1428 \text{ ч}$.

Пример 3 (для самостоятельной работы) – Построить графики функции потока отказов $H(t)$ и функции параметра потока отказов $\omega(t)$ для электродвигателей вентиляторов. Испытаниям подвергалась партия из пяти ($N = 5$) электродвигателей вентилятора автомобиля. Нарботки электродвигателей t_i ($1 \leq i \leq 5$) и соответствующие им суммарные количества отказов в партии $\sum m_i(t_i)$ приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Исходные данные для примера 3

t_1	$\sum m(t_1)$	t_2	$\sum m(t_2)$	t_3	$\sum m(t_3)$	t_4	$\sum m(t_4)$	t_5	$\sum m(t_5)$
500	2	600	3	700	5	800	8	900	10

6 Практическое занятие № 5. Количественные показатели долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости

Показатели ремонтпригодности должны задаваться в техническом задании на проектирование и оцениваться при разработке конструкции и изготовлении технических объектов в процессе их испытаний и эксплуатации. К ним относят: *вероятность восстановления, среднее время восстановления, интенсивность восстановления.*

Вероятность восстановления $v(t)$ – это вероятность восстановления работоспособного состояния за заданное время t . Соответственно, вероятность невосстановления работоспособного состояния $W(t) = 1 - v(t)$. Это вероятность, что восстановление работоспособного состояния объекта не закончится за заданное время t .

Статистической оценкой вероятности восстановления работоспособности рассматриваемого объекта за время t является отношение

$$v^*(t) = \frac{m(t)}{N},$$

а оценка вероятности невосстановления

$$w^*(t) = \frac{n(t)}{N},$$

где $m(t)$ – количество объектов, восстановленных за время t ;

$n(t)$ – количество объектов, оставшихся невосстановленными.

Среднее время восстановления – математическое ожидание восстановления работоспособности отказавшего объекта.

$$T_B = \int_0^{\infty} w(t) dt.$$

Статистически среднее время восстановления N объектов определяется, как

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N},$$

где x_i – время восстановления каждого из N объектов.

Интенсивность восстановления – это вероятность восстановления работоспособного состояния отказавшего объекта за малый промежуток времени.

$$\mu(t) = \frac{v(t, t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}.$$

Статистически оценка интенсивности восстановления выражается отношением

$$\mu^*(t) = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot n(t)},$$

где Δm – число восстановленных объектов в интервале Δt ;

$n(t)$ – число невосстановленных объектов к началу рассматриваемого временного интервала Δt .

Количественной мерой сохраняемости является *срок сохраняемости*, т. е. календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта, в течение которой сохраняется его работоспособное состояние, иными словами, сохраняются в установленных пределах значения параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции.

Срок сохраняемости, как и другие временные характеристики надёжности, является случайной величиной.

Поэтому единственным показателем сохраняемости технического объекта, имеющим практическое значение, является *гамма-процентный* (γ -процентный) *срок сохраняемости*, достигаемый объектом с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах. Обозначим: N – число объектов, находящихся на хранении; $n(t_c)$ – число объектов, сохранивших работоспособное состояние в течение срока хранения t_c . Оценка вероятности сохранения работоспособного состояния в течение срока хранения t_c равна

$$\gamma^* = \frac{n(t)}{N}.$$

Долговечность характеризуется либо временем, либо числом циклов, либо объёмом произведённой работы. Поэтому все показатели долговечности связаны, так или иначе, с понятием *ресурса* или *срока службы*.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или её возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Показатели долговечности следующие.

Гамма-процентный ресурс r_γ – суммарная наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах.

Гамма-процентный ресурс определяется из уравнения

$$\gamma = \int_{r_\gamma}^{\infty} f(r) dr,$$

где $f(r)$ – плотность распределения ресурса.

Средний ресурс R – математическое ожидание ресурса.

$$R = \int_{r_{\gamma}}^{\infty} r \cdot f(r) dr,$$

где r – ресурс.

Гамма-процентный срок службы t_{γ} – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах, определяется из уравнения

$$\gamma = \int_{t_{\gamma}}^{\infty} f_{cl}(t) dt,$$

где $f_{cl}(t)$ – плотность распределения срока службы.

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

$$T_{cl} = \int_0^{\infty} t \cdot f_{cl}(t) dt.$$

Пример 1 – На хранение положили 1000 автомобильных указателей поворотов. Спустя 500 ч проверили их состояние, при этом 100 автомобильных указателей поворотов оказались неработоспособными. Определить γ^* -процентный срок сохраняемости.

Решение

$$n = 1000; n(t) = 900; t_c = 500.$$

Тогда

$$\gamma^* = \frac{900}{1000} = 0,9 = 90 \ \%.$$

Таким образом, 500 ч – это 90-процентный срок сохраняемости, или $t_{c90\%} = 500$ ч.

Пример 2 (для самостоятельной работы) – На хранение положили 2000 автомобильных аккумуляторов. Спустя 300 ч проверили их состояние, при этом 10 аккумуляторов оказались неработоспособными. Определить γ^* -процентный срок сохраняемости.

7 Практическое занятие № 6. Расчет вероятности безотказной работы по структурным схемам

При определении надёжности электрооборудования необходимо учитывать сложность его устройства. При этом различные узлы и детали обладают разной надёжностью. Поэтому для конкретизации показателей надёжности таких сложных устройств, какими являются автомобили и тракторы, их условно разделяют на элементы и системы. Такое разделение позволяет рассчитать показатели надёжности системы в целом для выбора оптимальных вариантов конструкции уже на стадии проектирования.

Благодаря условному делению на элементы и системы, можно достаточно просто и с приемлемой для практики точностью построить методику расчета сложных систем. Для этого используют понятие функционального или логически последовательного, параллельного и смешанного соединений элементов в схеме (таблицы 7.1 и 7.2).

Таблица 7.1 – Варианты логического соединения элементов системы

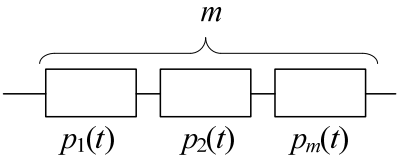
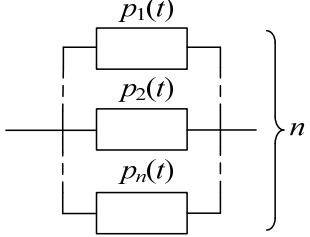
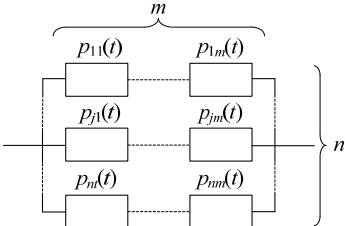
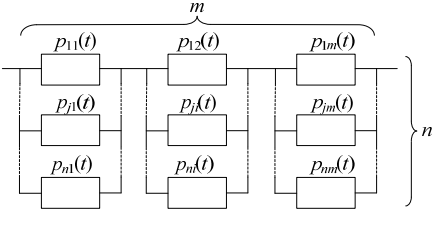
Логическое соединение элементов	Последовательное	Параллельное
Структура логического соединения элементов		
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при вероятности безотказной работы i -го элемента, равной $p_i(t) = p(t)$	$P(t) = \prod_1^m p_i(t)$	$P(t) = 1 - \prod_1^m [1 - p_i(t)]$
Повторить при равнонадежных элементах $p_i(t) = p(t)$	$P(t) = [p(t)]^m$	$P(t) = 1 - [1 - p(t)]^n$

Таблица 7.2 – Варианты логического соединения элементов системы

Логическое соединение элементов	Смешанное при резервировании	
	общем	раздельном
1	2	3
Структура логического соединения элементов		

Окончание таблицы 7.2

1	2	3
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при вероятности безотказной работы i -го элемента, равной $p_i(t)$	$P(t) = 1 - [1 - \prod_1^m p_{ij}(t)]^n$	$P(t) = \prod_1^m \{1 - [1 - p_{ij}(t)]^n\}$
Вероятность безотказной работы $P(t)$ при равнонадежных элементах $p_i(t) = p(t)$	$P(t) = 1 - [1 - p^n(t)]^m$	$P(t) = \{1 - [1 - p(t)]^n\}^m$

Пример 1 – Структурная схема для расчета надежности системы представлена на рисунке 7.1. Вероятности безотказной работы всех элементов одинаковы: $p_1 = p_2 = p_3 = 0,8$. Определить вероятность безотказной работы схемы, используя правила преобразования последовательно и параллельно включенных элементов.

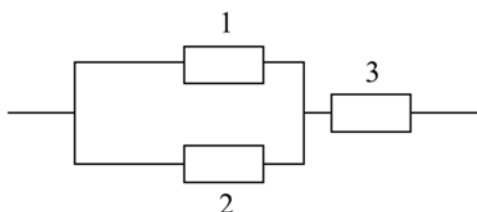


Рисунок 7.1 – Схема для расчета надежности

Решение

Определяем вероятность работы схемы, используя правила преобразования последовательно и параллельно включенных элементов. Для параллельно включенных элементов (1 и 2) вероятность безотказной работы определяется по формуле $P = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) = 1 - 0,2 \cdot 0,2 = 0,96$. Вероятность безотказной работы всей схемы: $P_{сх} = 0,96 \cdot 0,8 = 0,768$.

Пример 2 – Структурная схема для расчета надежности представлена на рисунке 7.2. Определим вероятность безотказной работы схемы. Вероятности безотказной работы элементов схемы одинаковы и равны 0,9.

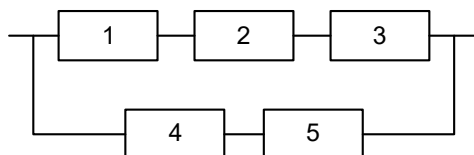


Рисунок 7.2 – Схема для расчета надежности

Решение

Для участка схемы с последовательно включенными элементами 1–3 результирующая вероятность безотказной работы равна

$$P_{1,2,3} = p_1 p_2 p_3 = 0,9^3 = 0,73.$$

Для участка схемы с последовательно включенными элементами 4, 5 результирующая вероятность безотказной работы равна

$$P_{4,5} = p_4 p_5 = 0,9^2 = 0,81.$$

Вероятность отказа участка схемы с последовательно включенными элементами 1–3: $Q_1 = 1 - P_{1,2,3} = 0,27$.

Вероятность отказа участка схемы с последовательно включенными элементами 4 и 5: $Q_2 = 1 - P_{4,5} = 0,19$.

Вероятность отказа схемы на рисунке 7.2: $Q = Q_1 Q_2 = 0,27 \cdot 0,19 = 0,05$.

Тогда искомая вероятность безотказной работы схемы равна $P = 1 - Q = 1 - 0,05 = 0,95$.

Пример 3 (для самостоятельной работы) – Структурная схема для расчета надежности представлена на рисунке 7.3. Определить вероятность безотказной работы схемы. Вероятности безотказной работы элементов схемы одинаковы и равны 0,9.

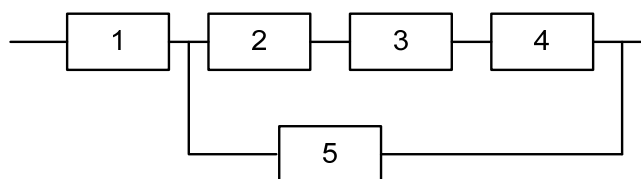


Рисунок 7.3 – Схема для расчета

8 Практическое занятие № 7. Расчет вероятности безотказной работы по структурным схемам с использованием алгебры логики

Рассмотрим пример расчета надежности системы, состоящей из двух параллельно включенных элементов (рисунок 8.1). Вероятность безотказной работы первого элемента обозначим p_1 , второго p_2 (здесь для сокращения записи опущены символы аргумента времени t).

Работоспособность всей системы обеспечивают следующие сочетания состояний элементов:

- первый элемент работает, а второй отказал. Тогда вероятность этого сочетания равна $p_1(1 - p_2)$;
- первый элемент отказал, а второй работает. Тогда вероятность этого сочетания $p_2(1 - p_1)$;
- оба элемента работают. Тогда вероятность этого сочетания равна $p_1 p_2$.

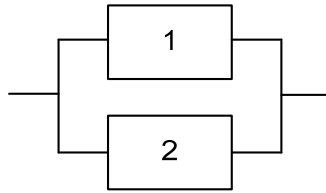


Рисунок 8.1 – Параллельное соединение двух элементов

Вероятность безотказной работы системы равна сумме вероятностей тех сочетаний состояний элементов, при которых обеспечивается работоспособное состояние системы

$$P_c = p_1(1 - p_2) + (1 - p_1)p_2 + p_1p_2 = p_1 + p_2 - p_1p_2.$$

Для расчета вероятности безотказной работы (далее – надежности) сложной системы достаточно рассмотреть все возможные сочетания состояний элементов системы; выбрать те сочетания, которые обеспечивают работоспособное состояние системы; записать вероятности каждого из этих сочетаний в виде произведения вероятностей состояний всех элементов в данном сочетании, причем вероятность работоспособного состояния элемента равна вероятности его безотказной работы p_i , а вероятность неработоспособного состояния – вероятности отказа $(1 - p_i)$. Полученное произведение называется элементарным. Для записи выражения вероятности безотказной работы системы складываются все элементарные произведения.

Чтобы избежать ошибок при большом числе элементов и сложной структуре системы, описанную процедуру формализуют с помощью математического аппарата алгебры логики – булевой алгебры, в которой любая переменная или функция имеет только два значения: 0 или 1.

При анализе надежности системы ее элементы могут рассматриваться как логические переменные x_i , а сама система – как логическая функция $y_k = f(x_i)$.

Соответственно:

- 1) $x_i = 1$, если элемент работоспособен;
- 2) $x_i = 0$, если элемент отказал;
- 3) $y = 1$, если система работоспособна;
- 4) $y = 0$, если система отказала.

Если система состоит из n элементов, то общее число различных сочетаний состояний элементов (наборов значений переменных x_i) равно 2^n .

Перебор всех наборов значений переменных x_i осуществляется путем построения таблицы состояний, имеющей следующий вид (таблица 8.1).

Поскольку в рассматриваемой системе число элементов $n = 2$, то число разных наборов значений переменных x , равно $2^2 = 4$.

Перебор всех наборов начинают с набора с номером 0, в котором все переменные x_i принимают нулевые значения.

Перебирая все наборы переменных x_i определяем значение переменной y , соответствующее каждому из них. В рассмотренном примере нулевому набору соответствует $y = 0$, а наборам 1, 2 и 3 $y = 1$.

Таблица 8.1 – Таблица состояний системы

Номер набора	Значение переменной		
	x_1	x_2	y
0	0	0	0
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	1

Для каждого набора, на котором $y = 1$, записывают элементарные произведения вероятностей состояний элементов, причем если x_i входит в как 1, то в элементарном произведении записывается вероятность безотказной работы этого элемента p_i , а если значение переменной $x_i = 0$, то в элементарное произведение входит вероятность отказа элемента $(1 - p_i)$.

Для получения вероятности безотказной работы системы складывают (логическая операция ИЛИ) элементарные произведения вероятностей состояния элементов.

В рассматриваемом примере выходная переменная $y = 1$ на наборах 1, 2 и 3, которым соответствуют элементарные произведения $(1 - p_1)p_2$, $p_1(1 - p_2)$ и p_1p_2 .

Вероятность безотказной работы системы

$$P_c = p_1(1 - p_2) + (1 - p_1)p_2 + p_1p_2 = p_1 + p_2 - p_1p_2.$$

Несмотря на некоторую громоздкость, логико-вероятные методы оказываются единственно возможными при расчете надежности систем, структуру которых нельзя представить в виде сочетания групп последовательно и параллельно соединенных элементов.

Пример 1 – Структурная схема для расчета надежности системы представлена на рисунке 8.2. Вероятности безотказной работы всех элементов одинаковы: $p_1 = p_2 = p_3 = 0,8$. Определить вероятность безотказной работы схемы логико-вероятностным методом расчета.

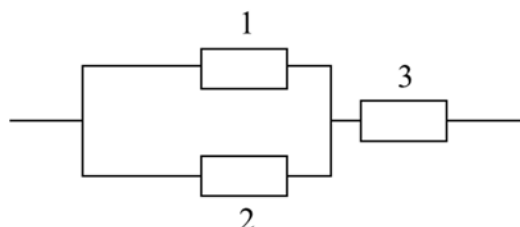


Рисунок 8.2 – Схема к примеру 1

Решение

Определяем вероятность работы схемы логико-вероятностным методом.

Таблица 8.2 – Состояния элементов

p_1	p_2	p_3	P_{cx}
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	1	1

Вероятность безотказной работы схемы:

$$\begin{aligned}
 P_{cx} &= p_1 p_2 (1 - p_3) + p_1 p_3 (1 - p_2) + p_1 p_2 p_3 = \\
 &= 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,2 + 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,2 + 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 0,768.
 \end{aligned}$$

Пример 2 (для самостоятельной работы) – Рассчитать возможные значения вероятностей работоспособности состояния для схем (рисунки 8.3 и 8.4). Исходные данные взять из таблицы 8.3, учитывая свой вариант. Расчеты произвести для двух случаев: $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5$ и $p_1 > p_2 > p_3 > p_4 > p_5$.

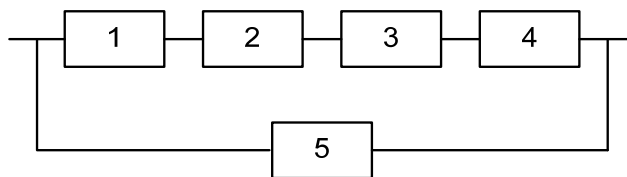


Рисунок 8.3 – Схема для расчета

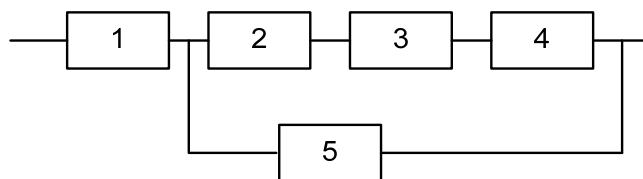


Рисунок 8.4 – Схема для расчета

Таблица 8.3 – Расчетные данные

Номер варианта	$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5$	$p_1 > p_2 > p_3 > p_4 > p_5$
1	0,8	$0,99 > 0,95 > 0,8 > 0,76 > 0,7$
2	0,79	$0,98 > 0,96 > 0,79 > 0,78 > 0,69$
3	0,78	$0,97 > 0,81 > 0,78 > 0,76 > 0,68$
4	0,77	$0,96 > 0,94 > 0,77 > 0,75 > 0,67$
5	0,76	$0,95 > 0,92 > 0,76 > 0,72 > 0,66$
6	0,75	$0,94 > 0,82 > 0,75 > 0,68 > 0,65$

9 Практическое занятие № 8. Коэффициентный метод расчета вероятности безотказной работы устройств автоэлектроники

Коэффициентный метод расчета вероятности безотказной работы устройств предполагает постоянство интенсивности отказов элементов λ и последовательное соединение элементов устройства в структурной схеме для расчета надежности. При этом методе расчета используются не абсолютные значения λ_i интенсивностей отказов, а коэффициенты надежности. Они представляют собой отношение λ_i и интенсивности отказов λ_δ некоторого базового элемента (эта базовая величина интенсивности отказов приводится в справочниках по расчету надежности устройств). Коэффициент надежности определяется по формуле $K_i = \lambda_i / \lambda_\delta$. Эта величина практически не меняется и является характеристической постоянной элемента. Режимы работы и условия окружающей среды учитываются поправочными коэффициентами $a_1, a_2, \dots, a_k$ к величине K_i . Для расчета надежности устройства необходимо знать коэффициенты надежности K_i , входящих в него элементов, число элементов и интенсивность отказов λ_δ базового элемента в заданных условиях эксплуатации, а также поправочные коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_k$. С учетом поправочных коэффициентов λ_i интенсивность отказов элемента устройства определяется следующим образом: $\lambda_i = \lambda_\delta K_i a_1 a_2 \dots a_k = \lambda_\delta K_i \prod a_k$. Тогда интенсивность отказов устройства из n элементов (параметр потока отказов) вычисляется по формуле

$$\lambda_{cuc} = \lambda_\delta \sum_{i=0}^n N_i K_i \prod a_k.$$

Вероятность безотказной работы устройства $P(T)$:

$$P(T) = e^{-\lambda_{cuc} \cdot T}.$$

Наработка на отказ $T_{отк.} = 1 / \lambda_{cuc}$.

Последовательность выполнения расчета надежности коэффициентным методом следующая:

1) определяются коэффициенты надежности каждого элемента по структурной схеме расчета надежности и интенсивность отказов базового элемента (справочные данные);

2) рассчитываются режимы работы элементов устройства (электрические нагрузки элементов) и определяются поправочные коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_k$, учитывающие режимы работы элементов и условия окружающей среды и другие условия (соответствующие графики в справочной литературе, например в [5]; чаще всего определяется коэффициент a_1 , учитывающий режим работы и условия окружающей среды);

3) определяется интенсивность отказов каждого элемента устройства:

$$\lambda_i = \lambda_\delta K_i a_1;$$

4) определяется интенсивность отказов устройства:

$$\lambda_{сис.} = \sum_{i=0}^n \lambda_i;$$

5) определяется вероятность безотказной работы устройства и наработка на отказ за время T :

$$P(T) = e^{-\lambda_{сис.} \cdot T}, \quad T_{отк} = 1 / \lambda_{сис.}$$

Пример 1 – Пускорегулирующая аппаратура электромеханического преобразователя состоит из пяти элементов. Отказ каждого из них ведет к отказу всей системы. Коэффициент надежности первого элемента равен 1,6; второго – 2,2; третьего, четвертого и пятого одинаковы и равны 3,5. Базовый элемент (резистор) и его интенсивность отказов $\lambda_{\delta} = 0,0000004 \text{ ч}^{-1}$, все элементы работают в номинальном режиме и при внешних условиях работы, соответствующих работе базового элемента. Определить вероятность безотказной работы через 1000 ч работы и наработку на отказ преобразователя.

Решение

Выход из строя любого из элементов преобразователя приводит к его отказу. Поэтому структурная схема для расчета надежности преобразователя представляет последовательно включенные пять элементов, коэффициенты надежности которых известны. Преобразователь работает в условиях, при которых поправочные коэффициенты могут быть взяты равными единице. Поэтому интенсивность отказов преобразователя может быть записана:

$$\begin{aligned} \lambda_{сис} &= \lambda_{\delta} \sum_{i=0}^n N_i K_i \prod a_1 a_2 \dots a_k = \lambda_{\delta} \sum_{i=0}^n N_i K_i = \\ &= 0,0000004(1,6 + 2,2 + 3,5 + 3,5 + 3,5) = 0,0000057 \text{ ч}^{-1}. \end{aligned}$$

Вероятность отказа через 1000 ч работы равна

$$P(T) = e^{-\lambda_{сис.} \cdot T} = P(1000) = e^{-0,0000057 \cdot 1000} = 0,995.$$

Наработка на отказ

$$T_{отк.} = 1 / \lambda_{сис} = 1 / 0,0057 = 175,4 \text{ ч.}$$

Пример 2 (для самостоятельной работы) – Схема управления пуском двигателя состоит из шести элементов. Отказ каждого из них ведет к отказу всей схемы. Коэффициент надежности первого элемента равен 1,6; второго – 2,2; третьего, четвертого и пятого одинаковы и равны 3,5, шестого – 3,1. Базовый элемент резистор и его интенсивность отказов $\lambda_{\delta} = 0,0000003 \text{ ч}^{-1}$ все элементы работают в номинальном режиме и при внешних условиях работы,

соответствующих работе базового элемента. Определить вероятность безотказной работы через 4000 ч работы и наработку на отказ схемы управления.

Список литературы

- 1 **Хорольский, В. Я.** Надежность электроснабжения / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – Москва : Форум, 2022. – 127 с.
- 2 **Тимошенков, С. П.** Основы теории надежности / С. П. Тимошенков, Е. М. Симонов, В. Н. Горшко. – Москва : Юрайт, 2015. – 445 с.
- 3 **Аполлонский, С. М.** Надежность и эффективность электрических аппаратов / С. М. Аполлонский. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 448 с.
- 4 **Горький, А. В.** Надёжность электроподвижного состояния: учебник / А. В. Горький, А. А. Воробьёв. – Москва : Маршрут, 2005. – 303 с.
- 5 **ГОСТ 27.002–89.** Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 47 с.
- 6 **Шимшарев, В. Ю.** Надежность технических систем: учебник / В. Ю. Шимшарев. – Москва : Академия, 2010. – 304 с.
- 7 **Кузнецов, Н. Л.** Сборник задач по надежности электрических машин / Н. Л. Кузнецов. – Москва : МЭИ, 2008. – 399 с.