Федеральное агентство по образованию

Дальневосточный государственный технический университет
(ДВПИ им. В.В. Куйбышева)

О.А. Курбатова, Л.С. Ксендзенко, Д.Н. Николайчук

НАДЕЖНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН

Рекомендовано Дальневосточным региональным
учебно-методическим центром в качестве учебного пособия
для студентов специальности 170100 «Горные машины
и оборудование» вузов региона

Владивосток
2005

УДК 621.31. 213.34.019.2
К 93

Курбатова, О.А. Надежность горных машин: учеб. пособие /О.А. Курбатова, Л.С. Ксендзенко, Д.Н. Николайчук. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.

Рассматриваются общие вопросы теории надежности, методы расчета надежности горных машин, характер отказов объектов, способы обеспечения надежности.

Предназначено для студентов горных специальностей.

Рецензенты: В.А. Игнатюк, д-р физ.-мат. наук, проф. (ТОВМИ им. С.О. Макарова); Ю.Д. Шмидт, д-р экон. наук, проф. (ДВГАЭУ)

Печатается с оригинал-макета, подготовленного авторами

ISBN

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Повышение технического уровня и качества продукции горного машиностроения, средств автоматизации, приборов, электрооборудования и схем электроснабжения относится к числу наиболее актуальных проблем, связанных с развитием современной техники, ее надежностью и долговечностью.

Интенсификация горных работ, повышение производительности машин и агрегатов, существенный качественный рост горного производства невозможны без повышения надежности технических средств горных предприятий.

Опыт эксплуатации горных предприятий показывает, что надежность горного оборудования пока недостаточна и во многом зависит от горнотехнических, организационных, погодно-климатических и эксплуатационных условий.

Горное оборудование на горных предприятиях открытых и подземных разработок эксплуатируется в тяжелых условиях, поэтому по отношению к нему особенно необходимо умелое содержание и своевременное проведение профилактических мер по предупреждению неисправности горных машин и электрооборудования.

Необходимость обеспечения надежности горных машин и электрооборудования и средств автоматики обусловлена высокими технико-экономическими требованиями к производственным процессам на горном предприятии, а также правилами безопасности труда горняков.

Под теорией надежности понимают научную дисциплину, которая изучает закономерности сохранения во времени техническими средствами свойства выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Основные вопросы, которые изучает теория надежности: отказы технических средств; критерии и количественные характеристики надежности; методы анализа и повышения надежности элементов и систем на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации; методы испытания технических средств на надежность; методы оценки эффективности повышения надежности.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Определение понятия надежности

В соответствии с ГОСТ 21.002-83 под надежностью понимают свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Определение надежности можно представить на следующих примерах:

1. Надежность – свойство сохранять во времени требуемые функции. Например, для двигателя – обеспечивать требуемый момент на валу и скорость.

2. Выполнение требуемых функций должно происходить при значениях параметров в установленных пределах, например, для электродвигателя – обеспечивать требуемый момент и скорость при температуре двигателя, не превышающей предела, отсутствии выделенного источника взрыва и пожара. Для очистного комбайна – обеспечивать заданную производительность при установленной крепости угля, мощности пласта, угле наклона и т.д.

3. Способность выполнять требуемые функции должна сохраняться в заданных режимах (например, в повторно-кратковременном режиме работы); в заданных условиях (например, в условиях повышенной запыленности, вибрации, температуры) и т.д.

4. Объект должен обладать свойством сохранять способность требуемой функции в различные фазы жизни изделия: при эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке.

Теория надежности является комплексной дисциплиной и состоит из разделов: математическая теория надежности; надежность по отдельным физическим критериям отказов; прогнозирование надежности; мероприятия по повышению надежности; контроль надежности; теория восстановления надежности; экономика надежности.

В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

изделие – единица продукции, выпускаемая или используемая на горном предприятии и т.д., например подшипник, редуктор, привод, очистной комбайн, экскаватор;

элемент – простейшая в данном рассмотрении составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей, например режущий орган комбайна;

система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций, например электропривод шагания экскаватора, система электроснабжения участка.

Понятие элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Машина (очистной комбайн, экскаватор, трансформатор) при установлении ее собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.д., а при изучении ее в комплексе с другими механизмами (механизированной крепью, транспортными средствами, линиями передачи электроэнергии) – как элемент.

Изделия делят на ***восстанавливаемые***, которые могут быть восстановлены на рабочем месте, например экскаватор, ленточный и скребковый конвейеры, пускатель и т.д., и ***невосстанавливаемые***, которые не могут быть восстановлены на рабочем месте и подлежат замене, например подшипники качения, звездочки, эпоксидные муфты и т.д.

Ряд изделий, относимых к невосстанавливаемым, например подшипники качения, звездочки, иногда восстанавливаются, но не на рабочем месте, а в специализированных мастерских. Сложные изделия, состоящие из многих элементов, как правило, восстанавливаются, так как отказы обычно связаны с повреждением одного или немногих элементов, в то время как другие остаются работоспособными. Простые элементы получаются с заводов изготовителей или восстанавливаются на предприятии.

Надежность – сложное свойство, поэтому в зависимости от назначения различных объектов горно-шахтного оборудования и условий их применения она может состоять из сочетаний свойств и событий.

Работоспособность – состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции с параметрами, установленными в технической документации. Работоспособность не касается требований, непосредственно не влияющих на эксплуатационные показатели, например повреждение окраски корпуса и т.д.

Исправность – состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям. Исправное изделие обязательно работоспособно.

Неисправность – состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам, и неисправности и их сочетания, приводящие к отказам.

Отказ – событие, заключающееся в полной или частичной утрате работоспособности. Отказы делят на отказы функционирования, при которых выполнение своих функций рассматриваемым элементом или объектом прекращается (например, поломка зубьев шестерни), и отказы параметрические, при которых некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах (например, уменьшение сопротивления изоляции электрооборудования).

Причины отказов делят на случайные и систематические.

Случайные причины – это непредусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем, ошибки обслуживающего персонала, сбои системы управления. Например, закалочные трещины, отклонение в размерах деталей, неровности дороги, наезды на препятствия и т.д. Случайные факторы преимущественно вызывают отказы при действиях в неблагоприятных сочетаниях.

Систематические причины – это закономерные явления, вызывающие постепенное накапливание повреждений: влияние внешней среды, времени, температуры, облучения, коррозии, старения, нагрузки и работы трения – усталость, ползучесть, износ, функциональные воздействия – засорения, залипания, утечки.

В соответствии с этими причинами и характером развития и проявления отказы делят на ***внезапные*** (при которых происходит скачкообразное изменение основных параметров – поломки от перегрузок, заедания), ***постепенные по развитию и внезапные по проявлению*** (усталостные разрушения, перегорания ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции) и ***постепенные*** (износ, старение, коррозия, замыкание). Внезапные отказы вследствие своей неожиданности более опасны, чем постоянные. ***Постепенные отказы*** представляют собой выходы параметров за границы допуска в процессе эксплуатации или хранения.

По причинам возникновения отказы можно разделить на ***конструкционные***, вызванные недостатками конструкции горного оборудования, ***технологические***, вызванные несовершенством или нарушением технологии изготовления отдельных элементов, и ***эксплуатационные,*** вызванные неправильной эксплуатацией (несоответствующими горнотехнологическими, климатическими условиями, неправильными действиями обслуживающего персонала).

Отказы в соответствии со своей физической природой бывают связанными с разрушением деталей или их поверхностей (поломки, выкрашивание, износ, коррозия, старение) или не связанными с разрушением (засорение смазки, каналов подачи жидкости в гидроприводах, ослабление соединений, загрязнение или ослабление электрических контактов). В соответствии с этим отказы устраняют заменой деталей, регулированием или очисткой.

По влиянию на безопасность работ отказы бывают ***безопасные***, когда возникновение отказа не может привести к травме обслуживающего персонала, например излом зубьев ковша, и ***опасные***, когда возникновение отказа может привести к травме персонала: уменьшение изоляции кабеля может привести к его пробою и утечке тока, а также электротравме персонала.

По взаимосвязи между собой отказы делятся на ***зависимые*** (тяжелые), например сход комбайна с конвейера в результате поломки соединений рештачного става конвейера, и ***независимые*** (средние и легкие), которые в отличие от зависимых не связаны с предшествующими отказами других элементов, и легкоустранимы.

По возможности дальнейшего использования изделия отказы делятся на ***полные***, исключающие возможность работы изделия до их полного устранения, и ***частичные***, при которых изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.

По сложности устранения различают отказы, ***устранимые в порядке технического обслуживания, в порядке среднего или капитального ремонта***, и по месту устранения **–** ***отказы, устранимые в эксплуатационных и стационарных условиях***, что особенно существенно для мощного, высокопроизводительного горного оборудования.

Встречаются также ***самоустраняющиеся*** отказы, например, в системах электроснабжения при предельном провесе проводов ЛЭП.

По времени возникновения отказы делят на ***приработочные***, возникающие в первый период эксплуатации, связанные с отсутствием приработки и с попаданием на сборку дефектных элементов, не отбракованных контролем; ***при нормальной эксплуатации*** (за период до появления износных отказов), ***износовые***.

Надежность изделий обусловливается их безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохраняемостью. Таким образом, надежность характеризуется свойствами, которые проявляются в эксплуатации и позволяют судить о том, насколько изделия оправдают надежды изготовителей и потребителей.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки, измеряемой, например, в тоннах добытого полезного ископаемого, метрах кубических вынутой горной массы, в машиночасах, километрах пробега транспорта или других единицах. Это свойство особенно важно для машин и электрооборудования, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Предельным называется состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо. Например, по условиям выполнения требований безопасности работ или при выходе заданных параметров за установленные пределы, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов. С усложнением систем все труднее становится находить причины отказов. Поэтому облегчение поиска отказавших элементов закладывается в конструкцию новых сложных горно-добычных и транспортных комплексов. Важность ремонтопригодности машин определяется огромными затратами на ремонт машин, комплексов и электрооборудования на горных предприятиях.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять значения установленных показателей его качества в заданных пределах в течение транспортировки.

Многоцелевое назначение электрического, электромеханического, пневматического и другого оборудования, автоматизированных комплексов горных предприятий приводит к необходимости различать те или другие стороны надежности с учетом причин, формирующих надежностные свойства объектов. Это приводит к необходимости подразделять надежность на следующие виды:

аппаратную надежность, обусловленную состоянием аппаратов. В свою очередь аппаратная надежность подразделяется на конструктивную, схемную, производственно-технологическую;

функциональную надежность, связанную с выполнением отдельных функций, возлагаемых на объект, элемент или систему;

эксплуатационную надежность, обусловленную качеством эксплуатации и обслуживания;

программную надежность, обусловленную состоянием программного обеспечения.

1.2. Показатели надежности

Для решения практических вопросов в области надежности используются показатели, с помощью которых характеризуется количественно уровень надежности горных машин, выемочных комплексов, агрегатов и их элементов.

Показатели надежности различаются в соответствии с компонентами надежности на показатели безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости.

По восстанавливаемости изделий они делятся на показатели для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий.

Эти показатели должны удовлетворять следующим требованиям:

учитывать различные факторы, влияющие на надежность;

быть наглядными и иметь физический смысл;

быть достаточно простыми и удобными для вычислений математических выражений.

Показатели надежности позволяют:

оценивать надежность при проектировании и определять ее экспериментально при испытаниях и в процессе промышленной эксплуатации;

оценивать влияние уровня надежности горных машин на их производительность;

намечать пути повышения надежности применяемого и вновь создаваемого оборудования;

рассчитывать необходимое количество запасных частей;

оценивать надежность выполнения горной машиной ее основных функций.

Показатели надежности определяются расчетным и экспериментальным путем. На уровень технической надежности оказывает влияние качество применяемых материалов и изготовления, а также выполнение технических условий на изготовление и заводские испытания.

Показатели безотказности

С учетом того, что возникновение и устранение отказов происходит по закону случайных событий, для количественной оценки надежности применяют характеристики, используемые в теории вероятностей и математической статистике.

Для оценки безопасности применяют следующие показатели:

T_{cp} – средняя наработка до первого отказа (среднее время безотказной работы);

T – наработка на отказ (среднее время между соседними отказами) для восстанавливаемых изделий;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы за время t (функция надежности);

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов;

$\lambda_1(t)$ – параметр потока отказов для восстанавливаемых изделий;

$\omega(t)$ – средняя частота отказов.

Под вероятностью безотказной работы понимают вероятность того, что в пределах заданного времени не произойдет отказа изделия [1, 2]:

$$P(t) = P(T \geq t), \tag{1.1}$$

где T – время от начала работы до отказа изделия; t – время, в течение которого определена вероятность безотказной работы.

Для установления значения вероятности безотказной работы на практике используют формулу статистического значения

$$P_c(t) = \frac{N_0 - N_1}{N_0}, \tag{1.2}$$

где N_0 – число образцов изделий в начале наблюдения; N_1 – число отказавших изделий за время t.

Пример. На угольном разрезе при эксплуатации из 10 участковых насосов в течение года отказали 3. Определить вероятность безотказной работы за год.

Решение:

$$P(t) = \frac{N_0 - N_1}{N_0} = \frac{10-3}{10} = 0{,}7.$$

Средняя наработка до первого отказа и среднее время между следующими друг за другом отказами определяется по выражению для математического ожидания случайной величины t:

$$\mathrm{T}_{cp} = \int_0^\infty t f(t) \partial t, \tag{1.3}$$

где t – случайная величина длительности времени до первого отказа или между средними отказами; $f(t)$ – плотность распределения случайной величины t (для различных схем отказов определяют по-разному).

На практике при расчете T_{cp} по результатам наблюдения статистический показатель $T_{c.cp}$ определяют по формуле

$$T_{c.cp} = \frac{\sum_1^{N_0} t_i}{N_0}, \tag{1.4}$$

где N_0 – число элементов под наблюдением; t_i – время безотказной работы i-го элемента.

Пример. При наблюдении за работой 10 экскаваторов было установлено следующее время наработки до отказа: 200; 350; 280; 400; 450; 360; 380; 430; 260 и 150 часов. Определить среднюю наработку на отказ экскаваторов.

Решение:

$$T_{cp} = \frac{\sum t_i}{N_0} = \frac{200+350+280+400+360+450+380+430+260+150}{10} =$$

= 326 часов.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ характеризует условную плотность вероятности возникновения отказов невосстанавливаемого изделия за рассматриваемый период времени в случае, если до этого их не наблюдалось:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (1.5)$$

На практике при установлении статистического значения $\lambda_c(t)$ пользуются формулой

$$\lambda_c(t) = \frac{N_1(t)}{N_{cp}\Delta t}, \quad (1.6)$$

где $N_1(t)$ – число отказавших изделий в интервале времени Δt (от $\frac{t-\Delta t}{2}$ до $\frac{t+\Delta t}{2}$); N_{cp} – среднее число исправно работавших изделий в интервале Δt.

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \quad (1.7)$$

где N_i, N_{i+1} – число исправно работающих изделий соответственно в начале и конце интервала Δt.

Пример. При эксплуатации 20 экскаваторов в течение 3 лет произошло 15 отказов электропривода подъема. Определить интенсивность отказов в течение периода эксплуатации.

Решение:

$$\lambda(t) = \frac{N_1(t)}{N_{cp}\Delta t} = \frac{15}{20 \cdot 3} = 0{,}25 \text{ года}^{-1}.$$

Параметр потока отказов $\lambda_1(t)$ для восстанавливаемого изделия характеризует плотность вероятности появления отказа ремонтопригодного объекта для определенного момента времени.

$$\lambda_1(t) = \frac{df(t)}{dt}, \quad (1.8)$$

где $f(t)$ - плотность распределения потока отказов за период времени t.

При определении этого показателя статистическим методом

$$\lambda_{c1}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i(t+\Delta t) - \sum_{i=1}^{N} n_i(t)}{N\Delta t}, \quad (1.9)$$

где $n_i(t)$ – количество отказов i–го образца для наработки t.

Пример. Электротехническое устройство состоит из 6 элементов. В течение года эксплуатации в первом элементе было 4 отказа, во втором – 2, в третьем – 4, в четвертом – 3, в пятом – 5, в шестом отказов не было. Определить параметр потока отказов устройства.

Решение:

$$\lambda_{cp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} n_i(t+\Delta t) - \sum_{i=1}^{N} n_i(t)}{N\Delta t} = \frac{(4+2+4+3+5)-0}{6\cdot 1} = 3$$

Таким образом, параметр потока отказов устройств в год составляет 3 отказа.

Средняя частота отказов $\omega(t)$ показывает отношение числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых образцов при условии, что отказавшие элементы заменяются исправными или восстанавливаются.

Другими словами, $\omega(t)$ – плотность распределения времени работы изделия до его отказа.

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N\Delta t}. \tag{1.10}$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ указывает на вероятность того, что в заданном интервале времени t' или в пределах заданной наработки не возникнет отказ изделия.

Величина вероятности безотказной работы за некоторый промежуток времени может быть определена на основе статистических данных, характеризующих результаты испытаний элементов на надежность, как отношение числа элементов $N(t)$, оставшихся исправными в конце рассматриваемого интервала времени t, к начальному числу испытываемых элементов $N(t_0)$:

$$\mathrm{P}^*(t) = \frac{N(t)}{N(t_0)}. \tag{1.11}$$

При значительном числе испытываемых элементов статистическая вероятность $P^*(t)$ сходится с вероятностью $P(t)$, т.е. в пределе, равном истинному значению вероятности безотказной работы. Это отношение называется эмпирической функцией надежности.

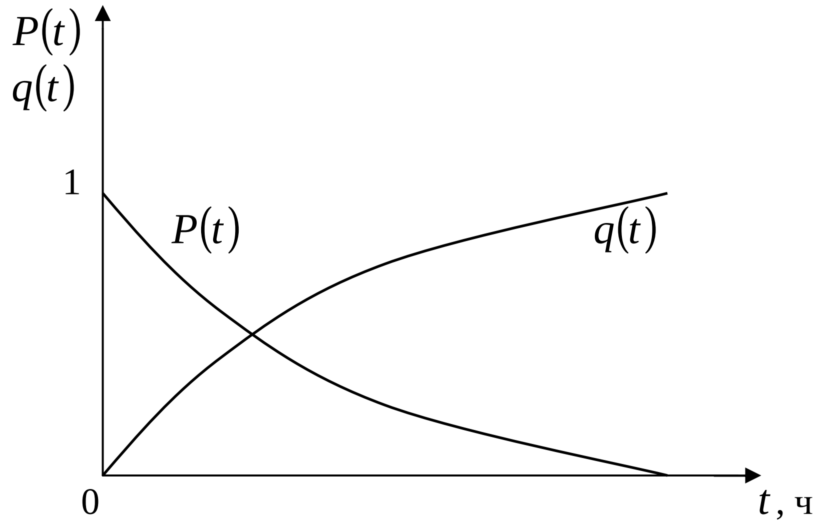


Рис. 1.1. Графики вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказа $q(t)$

Общими свойствами функции надежности для любых видов элементов являются следующие параметры: при $t = 0$ $P(0) = 1$, т.е. полагают, что в начальный момент времени элемент находится в исправном состоянии; $P(t)$ является не возрастающей функцией времени, т.е. она либо монотонно убывает, либо на отдельных участках может оставаться постоянной; при $t \to \infty$ $P(t) \to 0$, т.е. при возрастающем времени работы элемента вероятность его безотказной работы уменьшается и стремится к нулю.

Убывающая кривая полностью характеризует собой безопасность и долговечность неремонтируемых изделий. Наработка неремонтируемого изделия наступает при отказе и является его ресурсом. Различают ресурс до первого ремонта, межремонтный ресурс, средний ресурс.

Гамма-процентный ресурс выражает наработку, в течение которой изделие с заданной вероятностью γ- процентов не достигает предельного состояния. Вероятность в этом случае устанавливается согласно статистическим моделям отказов:

$$\mathrm{P}(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \tag{1.12}$$

где γ - число изделий, %, не достигающих с заданной вероятностью предельного состояния.

Срок службы $T_{сл}$ представляет собой календарную продолжительность эксплуатации или использования изделия до момента возникновения предельного состояния или списания.

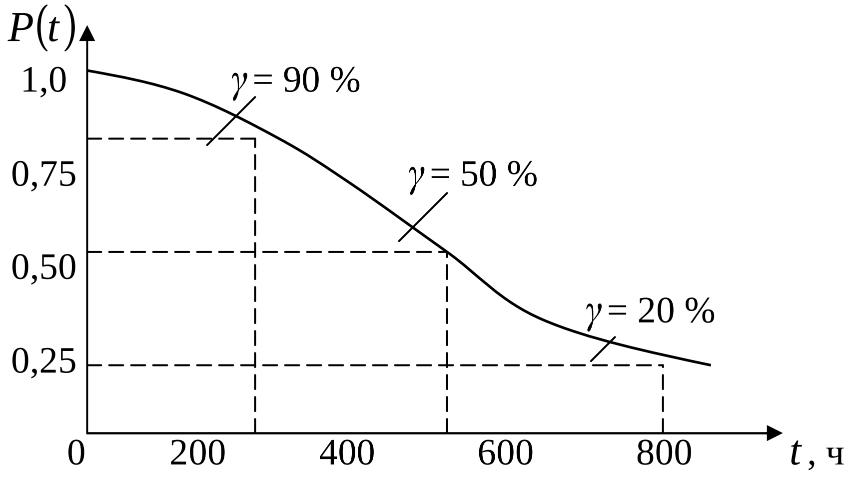


Рис. 1.2. Определение ресурса объекта

На рис. 1.2 видно, что минимальному ресурсу 200 часов соответствует 90% изделий, 500-часовым ресурсом обладает 50% изделий, а 800-часовым ресурсом обладает всего 20% изделий.

Показатели ремонтопригодности

Для оценки ремонтопригодности применяются следующие показатели:

$P_{\text{в}}(t)$ – вероятность восстановления за время $t_{\text{в}}$;

$T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления;

$\mu(t)$ – интенсивность восстановления;

$k_{\text{г}}$ – коэффициент готовности;

$k_{\text{а}}$ – коэффициент аварийного простоя;

$H(t)$ – среднее число ремонтов (восстановлений) за время t.

Показатели ремонтопригодности характеризуют восстанавливаемые изделия.

Вероятность восстановления $P_{\text{в}}(t)$ представляет собой вероятность того, что случайное время восстановления изделия будет не более заданного.

$$P_{\text{в}}(t) = P(t_{\text{в}} \le T_{\text{в}}). \tag{1.13}$$

Среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ предусматривается как математическое ожидание случайной величины $t_{\text{в}}$; статистически определяется по формуле

$$\text{Т}_{\text{с.в}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{\text{в}_i}}{n}, \tag{1.14}$$

где $t_{\text{в}_i}$ – время восстановления i-го изделия.

Интенсивность восстановления представляет собой число восстановлений в единицу времени:

$$\mu(t) = \frac{1}{T_{\text{с.в}}}. \qquad (1.15)$$

В общем случае время, затрачиваемое на ликвидацию отказов j-го типа, представляет собой сумму следующего вида:

$$t_j = t_{oj} + t_{п.зj} + t_{опj} + t_{дj}, \qquad (1.16)$$

где t_{oj} - время ожидания, связанное с необходимостью обнаружения отказа; $t_{п.зj}$ – подготовительно-заключительное время, затраченное на подготовку запасных частей, инструмента перед началом и после ликвидации отказа; $t_{опj}$ – оперативное время, характеризующее затраты времени исполнителей на выполнение основных и вспомогательных операций при ликвидации отказа; $t_{дj}$ – дополнительное время на отдых и личные надобности исполнителей.

Показатель $T_{\text{в}}$, определенный по времени простоев, характеризует не только ремонтопригодность объекта, но и организацию ремонтной службы, ее обеспеченность запасными частями и инструментами.

Если имеются данные о величине указанных составляющих затрат времени, то можно получить показатели ремонтопригодности, базирующиеся на использовании оперативного времени и оперативной трудоемкости работ, при этом средняя оперативная продолжительность внепланового текущего ремонта (устранения отказа) данного вида

$$T_{\text{вн}j} = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} t_{опj}, \qquad (1.17)$$

где n_j - количество внеплановых текущих ремонтов (отказов) j-го вида за расчетный период.

Средняя оперативная трудоемкость внепланового текущего ремонта (устранения отказов) данного вида

$$W_{\text{вн}j} = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} W_{опj}, \qquad (1.18)$$

где W_{onj} - трудоемкость выполнения одного внепланового текущего ремонта (устранения одного отказа) j-го вида, чел.-ч.

Средняя оперативная продолжительность планового текущего ремонта данного вида

$$T_{\text{в.}плк} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} t_{onk} , \tag{1.19}$$

где n_k – количество плановых текущих ремонтов k-го вида за расчетный период.

Средняя оперативная трудоемкость планового текущего ремонта данного вида

$$W_{плk} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} W_{onk} , \tag{1.20}$$

где $W_{плk}$ - оперативная трудоемкость выполнения одного планового текущего ремонта k-го вида за расчетный период, чел.-ч.

Средняя оперативная трудоемкость технического обслуживания данного вида

$$W_{обсi} = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} W_{oni} , \tag{1.21}$$

где n_i – количество работ по техническому обслуживанию i-го вида за расчетный период; W_{oni} – оперативная трудоемкость выполнения технического обслуживания i-го вида, чел.-ч.

Коэффициент готовности $K_\text{г}$ является комплексным показателем, отражающим безотказность и ремонтопригодность изделия.

$$K_\text{г} = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} t_{\text{в}i}}, \tag{1.22}$$

т.е. представляет собой отношение суммарного времени работоспособного состояния и суммарного времени восстановления (время плановых профилактических ремонтов исключается).

Коэффициент готовности представляет собой вероятность исправного состояния изделия и характеризует его готовность к работе в любой момент времени.

Коэффициент аварийного простоя $K_а$ является комплексным показателем, характеризующим вероятность восстановления изделия в любой момент времени:

$$K_а = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{вi}}{\sum_{i=1}^{n} t_i + \sum_{i=1}^{n} t_{вi}}. \qquad (1.23)$$

Коэффициенты $K_г$ и $K_а$ связаны между собой соотношением $K_г + K_а = 1$.

Удельный вес количества отказов какого-либо элемента и удельный вес простоев из-за отказа этого элемента могут характеризоваться коэффициентом отказов K_o и относительных простоев n_j.

Коэффициент отказов представляет собой отношение количества отказов по элементу n_j к общему количеству отказов:

$$K_o = \frac{n_j}{n}. \qquad (1.24)$$

Коэффициент относительных простоев – это отношение времени простоев из-за отказов элемента к общему времени простоя машины, комплекса или агрегата из-за всех простоев:

$$K_{оп} = \frac{nT_{вj}}{n\mathrm{T}_в} = \mathrm{K}_o \frac{\mathrm{T}_{вj}}{\mathrm{T}_в}. \qquad (1.25)$$

Оценка средств, затрачиваемых на поддержание надежности машин в процессе эксплуатации, может производиться с помощью коэффициента стоимости эксплуатации $K_{сэ}$.

$$K_{сэ} = \frac{C_э}{C_o}, \qquad (1.26)$$

где $C_э$ – стоимость эксплуатации до капитального ремонта, состоящая из затрат на проведение ремонтно-профилактических работ, и затрат, связанных с возникновением и ликвидацией отказов (стоимость запасных частей и ремонтов, эксплуатационные расходы, убытки из-за простоев лавы во время устранения отказов и др.); C_o - стоимость горного оборудования.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение надежности.
2. Какие обобщенные объекты рассматриваются в теории надежности?
3. Из каких разделов состоит дисциплина «Надежность»?
4. По каким критериям изделия делят на восстанавливаемые и невосстанавливаемые?
5. Назовите свойства надежности.
6. Приведите отличия исправного и работоспособного оборудования.
7. Дайте определение отказа оборудования.
8. Назовите причины отказов горных машин.
9. Какими параметрами обусловливается надежность оборудования?
10. Как различаются показатели надежности?
11. Каким требованиям должны удовлетворять показатели надежности?
12. Дайте определение вероятности безотказной работы.
13. Дайте определение интенсивности отказов.
14. Чем характеризуется параметр потока отказов?
15. Дайте определение ресурса оборудования.
16. Объясните параметры надежности горного оборудования при $t = 0$; $P = 1$.
17. На основе каких данных может быть определена величина безотказной работы за некоторый промежуток времени?
18. Дайте определение гамма-процентного ресурса.
19. Назовите показатели ремонтопригодности.
20. Что характеризуют коэффициенты: готовности, аварийного простоя, относительных простоев?
21. Как между собой связаны коэффициенты готовности и аварийного простоя?
22. Дайте определение интенсивности восстановления.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

2.1. Вероятность события

Основополагающим понятием в теории вероятностей является понятие *события, под которым понимают всякий факт, могущий произойти или не произойти в результате опыта.*

События можно разделить на 3 группы.

Достоверные события. Достоверное событие обязательно произойдет, если будут выполнены вполне определенные условия. Причины достоверного события немногочисленны, очевидны и поддаются точному учету.

Невозможные события, т.е. такие, которые при определенных и известных условиях произойти не могут, так как отсутствуют причины для их возникновения. Эти причины тоже можно учесть и на основе их анализа сделать вывод о невозможности данного события.

Случайные (вероятные) события. Так как неизвестно, когда эти события произойдут и произойдут ли вообще в интересующий отрезок времени.

Случайные события не являются беспричинными, они имеют множество причин, но нельзя заранее точно предсказать возникнет та или иная совокупность причин, которая приведет к данному событию.

Численной мерой степени возможности какого-либо случайного события A является его вероятность $P(A)$.

Вероятность невозможного и достоверного события приняты соответственно **0** и **1.** Вероятность случайных событий может принимать значения.

$$0 \le P(A) \le 1. \tag{2.1}$$

События в данном опыте образуют полную группу, если в результате опыта непременно должно произойти хотя бы одно из них.

Несколько событий называются ***несовместными*** в данном опыте, если ни какие два из них не могут произойти вместе. Типичным примером является ***отказ и безотказная работа объекта.***

Когда события в некотором опыте являются равновозможными, несовместными и образуют полную группу, то про такой опыт говорят, что он сводится к схеме случаев, при этом вероятность некоторого события A подсчитывается как отношение числа случаев $N_б$ благоприятных появлению события A к общему числу случаев $N_о$.

$$P(A) = \frac{N_б}{N_о}. \tag{2.2}$$

Определенная таким образом вероятность является математической, так как она рассчитана.

Для событий, не сводящихся к схеме случаев, т.е. когда в результате произведения n опытов заранее известно сколько раз может произойти событие A, существует понятие частоты события A.

Частота события называется статистической вероятностью и отличается от математической вероятности

$$P^{*}(A)=\frac{m}{n}, \tag{2.3}$$

где m – число появления события A.

Для небольшого числа опытов n частота событий A носит в значительной степени случайный характер и может заметно изменяться от одной группы опытов к другой. При увеличении числа опытов частота события $P^{*}(A)$ сходится по вероятности с вероятностью события $P(A)$.

Знание вероятности какого-либо случайного события не дает однозначного ответа на вопрос, произойдет ли указанное событие при проведении данного опыта или нет.

Наряду с понятием случайного события существует важное понятие случайной величины, т.е. величины, которая в результате опыта может принять то или иное неизвестное заранее значение.

Случайные события могут быть ***дискретными и непрерывными.*** Случайные события, принимающие только отдельные друг от друга значения, называются ***дискретными.*** Примером дискретной величины может являться количество отказов горной машины, возникающих за какой то период ее работы, которое может принимать значения: 0, 1, 2, …

Случайные величины, возможные значения которых непрерывно заполняют некоторый промежуток, называются ***непрерывными*** (время безотказной работы горной машины, время устранения отказа и т.д.).

2.2. Теоремы, применяемые в теории надежности

Теорема сложения вероятностей несовместных событий

Вероятность появления одного из двух несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A+B)=P(A)+P(B). \tag{2.4}$$

Вероятность появления одного из нескольких попарно несовместных событий, безразлично какого, равна сумме вероятностей этих событий

$$P(A_1+A_2+...+A_n)=P(A_1)+P(A_2)+...+P(A_n).$$

Теорема сложения вероятностей совместных событий

Вероятность появления хотя бы одного из двух совместных событий равна сумме вероятностей этих событий без вероятности их совместного появления:

$$\mathrm{P}(A+B)=P(A)+P(B)-P(AB). \qquad (2.5)$$

Теорема может быть обобщена на любое конечное число совместных событий

$$P(A+B+C)=P(A)+P(B)+P(C)-P(AB)-P(AC)-P(BC)+P(ABC)$$

Следствие 1. Если появление хотя бы одного из n несовместных событий является достоверным событием, то события A_i составляет полную группу несовместных событий.

$$P(A)=\sum_{i=1}^{n}P(A_i)=1, \qquad (2.6)$$

так как одно из событий явилось достоверным.

В этом случае вероятность $P(A_m)$ появления m и более событий $(1\le m\le n)$ будет равна

$$P(A_m)=\sum_{i=m}^{n}P(A_i),$$

а вероятность события A_{m-1}, заключающегося в появлении меньше, чем m событий,

$$P(A_{m-1})=\sum_{i=1}^{m-1}P(A_i).$$

Следствие 2. Два несовместных события A и $\overline{A}$, образующие полную группу случайных событий, называются противоположными событиями. Поскольку противоположные события образуют полную группу и несовместны, сумма их вероятности

$$P(A)+P(\overline{A})=1. \qquad (2.7)$$

Пример: отказ и безотказная работа элемента.

Теоремы умножения вероятностей

Вероятность совместного появления двух независимых событий равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B) \qquad (2.8)$$

Вероятность появления нескольких событий, независимых в совокупности, равна произведению вероятностей этих событий

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \ldots \cdot A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3) \cdot \ldots \cdot P(A_n).$$

Вероятность совместного появления двух зависимых событий равна произведению вероятности одного из них на условную вероятность второго

$$\begin{aligned} P(AB) &= P(A) \cdot P_A(B); \\ P(AB) &= P(B) \cdot P_B(A). \end{aligned} \qquad (2.9)$$

Следствие. Вероятность совместного появления нескольких зависимых событий равна произведению вероятности одного из них на условные вероятности всех остальных, причем вероятности каждого последующего события вычисляются в предположении, что все предыдущие события уже появились.

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \ldots \cdot A_n) = \mathrm{P}(A_1) \cdot \mathrm{P}_{A_1}(A_2) \cdot P_{A_1 A_2}(A_3) \cdot \ldots \cdot P_{A_1 \ldots A_{n-1}}(A_n),$$

где $P_{\mathrm{A}_1 A_2 \cdots \mathrm{A}_{n-1}}(A_n)$ – вероятность события A_n, вычисленная в предположении, что события $A_1, A_2, \ldots, A_{n-1}$ наступили.

Теорема вероятности появления хотя бы одного события

Пусть события $A_1, A_2, \ldots, A_n$ независимы в совокупности, причем $P(A_1) = p_1$, $P(A_2) = p_2$, …, $P(A_n) = p_n$, а в результате испытаний могут наступить все события, либо часть из них.

Вероятность наступления события A, состоящего в появлении хотя бы одного из событий $A_1, A_2, \ldots, A_n$, независимых в совокупности, равна разности между единицей и произведением вероятности противоположных событий $\overline{A}_1, \overline{A}_2, \ldots, \overline{A}_n$.

$$P(A) = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot \ldots \cdot q_n, \qquad (2.10)$$

где $q_1 = P(\overline{A})$, $q_2 = P(\overline{A}_2)$, …, $q_n = P(\overline{A}_n)$.

В частности, если все n событий имеют одинаковую вероятность, то вероятность появления хотя бы одного из этих событий

$$P(A) = 1 - q^n.$$

Теорема полной вероятности

Теорема полной вероятности формируется на основании теорем сложения и умножения вероятностей.

Пусть сложное событие A может произойти только с осуществлением n некоторых других несовместных событий - предположений, называемых гипотезами H_i, образующими полную группу несовместных событий H.

$$H = H_1 + H_2 + \ldots + H_i + \ldots + H_n, \qquad (2.11)$$

$$P(H) = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1.$$

Событие A может осуществлиться, если произойдет одно из следующих парных событий: H_i с вероятностью $P(H_i)$ и A/H_i с вероятностью $P(A/H_i)$.

Вероятность появления события A определяется по формуле полной вероятности

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot P(A/H_i). \qquad (2.12)$$

Пример. Требуется определить вероятность отказа секции механизированной крепи q_c за время работы t, если вероятности независимых отказов q_i ее элементов: гидростоек (ГС), гидроцилиндров передвижки (ГП), металлоконструкции (МК) и блока управления секцией (БУ) составляют для времени t соответственно:

$q_{\text{гс}} = 0{,}05$; $q_{\text{гп}} = 0{,}02$; $q_{\text{мк}} = 0{,}03$ и $q_{\text{бу}} = 0{,}04$.

Дадим понятие события «отказ секции крепи». Секция крепи откажет, если откажут: гидростойка или гидроцилиндр передвижки, или металлоконструкция, или блок управления, или гидростойка и гидроцилиндр, или гидростойка и металлоконструкция и т. д.

Поэтому для рассматриваемого события следует, что для расчета вероятности отказа q_c секции механизированной крепи следует использовать теорему сложения вероятностей для совместных событий, а для определения вероятности безотказной работы теорему умножения вероятностей для независимых событий.

Таким образом:

$$q_{\text{с}} = q_{\text{гс}} + q_{\text{гп}} + q_{\text{мк}} + q_{\text{бу}} - q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{гп}} - q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{мк}} - q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{бу}} - q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{мк}} -$$
$$- q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{бу}} - q_{\text{мк}} \cdot q_{\text{бу}} + q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{мк}} + q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{бу}} + q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{мк}} \cdot q_{\text{бу}} +$$
$$+ q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{мк}} \cdot q_{\text{бу}} - q_{\text{гс}} \cdot q_{\text{гп}} \cdot q_{\text{мк}} \cdot q_{\text{бу}}.$$

Подставим вместо q_i их величины, получим

$q_{\text{с}}$ = 0,05+0,02+0,03+0,04-0,05·0,02-0,05·0,03-0,05·0,04-0,02·0,03-0,02·0,04-
-0,03·0,04+0,05·0,02·0,03+0,05·0,02·0,04+0,05·0,03·0,04+0,02·0,03·0,04-
-0,05·0,02·0,03·0,04 = 0,133.

Для решения поставленной задачи может быть применена теорема умножения вероятностей для независимых событий. Событие «безотказная работа» секции крепи P_c за время t осуществляется, если безотказно будут работать ГС, ГП, МК и БУ, тогда

$$P_{\text{с}} = P_{\text{гс}} \cdot P_{\text{гп}} \cdot P_{\text{мк}} \cdot P_{\text{бу.}}$$

Поскольку отказ и «безотказная работа» секции крепи – события противоположные, то величины $P_{\text{гс}}, P_{\text{гп}}, P_{\text{мк}}, P_{\text{бу}}$ могут быть найдены по заданным значениям $q_{\text{гс}}, q_{\text{гп}}, q_{\text{мк}}, q_{\text{бу}}$, а именно

$$P_{\text{гс}} = 1 - q_{\text{гс}}; P_{\text{гп}} = 1 - q_{\text{гп}}; P_{\text{мк}} = 1 - q_{\text{мк}}; P_{\text{бу}} = 1 - q_{\text{бу}}.$$

В итоге получаем

$$P_{\text{с}} = (1–0,05) \cdot (1–0,02) \cdot (1–0,03) \cdot (1–0,04) = 0,867.$$
$$q_c = 1 - P_c = 1 – 0,867 = 1,33.$$

Формула Бейеса

Теорема гипотез является следствием теоремы умножения и формулы полной вероятности.

Имеется полная группа несовместных гипотез $H_1, H_2, ..., H_n$. *Известны доопытные вероятности этих гипотез* $P(H_1), P(H_2), ..., P(H_n)$. *Известны также условные вероятности* $P(A/H_i)$ *сложного события* A, *которое может появиться вместе с одной из гипотез* H_i.

Производится опыт, в результате которого произошло событие A, но неизвестно, вместе с какой из гипотез H_i осуществилось это событие.

В этом случае значения условных послеопытных вероятностей гипотез $P(H_i / A)$ определяется по теореме гипотез:

$$P(H_i / A) = \frac{P(H_i) \cdot P(A/H_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot P(A/H_i)} \qquad (2.13)$$

Пример. При работе очистного механизированного комплекса, состоящего из выемочной машины – B, доставочной машины – $Д$, и крепи - $К$ в разные моменты смены согласно технологии горных работ могут функционировать одна или несколько машин одновременно. Гипотеза H_1 – функционируют три машины B, $Д$, $К$; гипотеза H_2 – функционируют $Д$ и $К$; гипотеза H_3 – функционирует только крепь $К$. Обычно B, $Д$ и $К$ функционируют 40% времени смены, т.е. $P(H_1) = 0{,}4$; $Д$ и $К$ – 5% времени т.е. $P(H_2) = 0{,}05$; $К$ – 55% времени т.е. $P(H_3) = 0{,}55$.

Условные вероятности появления опасных отказов оборудования (события A) соответственно равны: $P(A/H_1) = 0{,}03$; $P(A/H_2) = 0{,}02$; $P(A/H_3) = 0{,}01$.

Требуется определить условную вероятность $P(H_1 / A)$ и вероятность $P(\overline{A})$ события $\overline{A}$ (непоявления опасного отказа) в любой момент смены.

$$P(A) = P(H_1) \cdot P(A/H_1) + P(H_2) \cdot P(A/H_2) + P(H_3) \cdot P(A/H_3) =$$

$= 0{,}4 \cdot 0{,}03 + 0{,}05 \cdot 0{,}02 + 0{,}55 \cdot 0{,}01 = 0{,}0185.$

$$P(H_1 / A) = \frac{P(H_1) \cdot P(A/H_1)}{\sum_{i=1}^{3} P(H_i) \cdot P(A/H_i)} = \frac{0{,}012}{0{,}0185} = 0{,}6486.$$

Повторение опытов

В теории надежности приходится встречаться с задачами, в которых один и тот же опыт повторяется неоднократно. В результате каждого опыта может появиться или не появиться некоторое событие A. При этом интерес представляет не результат каждого отдельного опыта, а общее число появления события A. Такие опыты называются независимыми относительно события A.

Когда при проведении n независимых опытов вероятность P появления события A во всех опытах одна и та же, то вероятность того, что событие A наступит, ровно k раз, не менее k раз, более k раз, и не более k раз, может быть определена по формуле Бернулли и теоремам Лапласа.

Формула Бернулли

Вероятность того, что в n независимых опытах, в каждом из которых вероятность появления события $P(0 \leq p \leq 1)$, событие A наступит ровно k раз (безразлично в какой последовательности).

$$P_n(k) = c_n^k \cdot p^k \cdot q^{n-k}, \qquad (2.14)$$

или

$$P_n(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k \cdot q^{n-k}, \qquad (2.15)$$

где $q = 1 - p$.

Вероятность того, что событие наступит:

менее k раз

$$P_n(0) + P_n(1) + ... + P_n(k-1); \qquad (2.16)$$

более k раз

$$P_n(k+1) + P_n(k+2) + ... + P_n(n); \qquad (2.17)$$

не менее k раз

$$P_n(k) + P_n(k+1) + ... + P_n(n); \qquad (2.18)$$

не более k раз

$$P_n(0) + P_n(1) + ... + P_n(k). \qquad (2.19)$$

Пример. Требуется рассчитать вероятность появления равно 0, 1, 2, 3 и 4-х отказов секций механизированной крепи в четырех ($n = 4$) независимых опытах (рабочих сменах) секции механизированной крепи, если вероятность отказа секции $q_c(t = 6ч) = 0{,}133$, а вероятность безотказной работы $P_c(t = 6ч) = 1 - q_c(t = 6ч) = 0{,}867$.

$k = 0$: $\quad P_4(0) = c_4^0 \cdot q^0 \cdot p^4 = 1 \cdot 1 \cdot 0{,}867^4 = 0{,}56504$;

$k=1$: $\quad P_4(1)=c_4^1\cdot q^1\cdot p^3=4\cdot 0{,}133\cdot 0{,}867^3=0{,}34671;$

$k=2$: $\quad P_4(2)=c_4^2\cdot q^2\cdot p^2=\dfrac{4!}{2!\cdot(4-2)!}\cdot 0{,}133^2\cdot 0{,}867^2=0{,}07978;$

$k=3$: $\quad P_4(3)=c_4^3\cdot q^2\cdot p^1=\dfrac{4!}{3!(4-3)!}\cdot 0{,}133^2\cdot 0{,}867=0{,}00816;$

$k=4$: $\quad P_4(4)=c_4^4\cdot q^4\cdot p^0=1\cdot 0{,}133^4\cdot 1=0{,}00031.$

При этом $\sum\limits_{k=0}^{n}P_n(k)=1$, что и подтверждают полученные результаты расчетов.

Менее К раз

$$P_n(0)+P_n(1)+...+P_n(k-1)=0{,}56504+0{,}34671+0{,}07978+0{,}00816=0{,}99969$$

не менее К раз

$$P_n(k)+P_n(k+1)+...+P_n(k)=0{,}00031;$$

не более К раз

$$P_n(0)+P_n(1)+...+P_n(k)=1.$$

Теорема Лапласа (локальная)

Вероятность того, что в n независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления события равна $P(0<p<1)$, событие наступает ровно k раз (безразлично в какой последовательности) т.е.

$$P_n(k)=\frac{1}{\sqrt{npq}}\cdot\varphi(x), \qquad (2.20)$$

где $\varphi(x)=\dfrac{1}{\sqrt{2\pi}}\cdot\lambda^{-\frac{x^2}{2}}$; $\quad x=\dfrac{k-np}{\sqrt{npq}}$;

$\varphi(x)$ - находят по таблицам.

Теорема Лапласа (интегральная)

Вероятность того, что в n независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления события равна $P(0 < p < 1)$, событие наступит не менее k_1 не более k_2 раз, т.е.

$$P_n(k_1, k_2) = \Phi(x'') - \Phi(x'), \qquad (2.21)$$

где $\Phi(x) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \lambda^{-\frac{z^2}{2}} dz$ - функция Лапласа;

$$x' = \frac{k_1 - np}{\sqrt{npq}}; \qquad x'' = \frac{k_2 - np}{\sqrt{npq}}.$$

Пример. Случайные значения времени работы t очистного комбайна между отказами подчиняются экспоненциальному закону распределения. Средняя наработка на отказ комбайна T_o = 19 ч. Требуется определить вероятность безотказной работы $P(t)$ комбайна для шестичасовой рабочей смены (t = 6 ч) и вероятность попадания СВ в интервал α = 9 ч; β = 19 ч.

По формуле (10), приняв t = 6 ч и $m_t = T_o = 19$ ч, получим

$$P(t = 6ч) = \lambda^{-\frac{6}{19}} = \lambda^{-0,316} = 0,729.$$

По формуле (12):

$$Bep(9ч \le t < 19ч) = \lambda^{-\frac{9}{19}} - \lambda^{-\frac{19}{19}} = \lambda^{-0,474} - \lambda^{-1} = 0,623 - 0,368 = 0,255.$$

Пример. Средняя наработка до отказа элементов горной машины, теряющего работоспособность по причине изнашивания составляет $T_1 = 1200$ ч, случайные величины наработки до времени t_i подчиняются нормальному закону распределения. Коэффициент вариации V_t = 0,35. Рассчитать $P(t)$ для t = 300 ч и вероятность попадания СБ на интервале с границами α = 1000 ч и β = 2000 ч.

По формуле (15)

$$P(t = 300) = 0,5 - \phi\left(\frac{300 - m_t}{\sigma_t}\right).$$

Приняв $m_t = T_1 = 1200$ ч и $\sigma_t = \upsilon_t m_t = 0,35 \cdot 1200 = 420$ ч, получим

$$P(t=300)=0{,}5-\phi(\frac{300-1200}{420})=0{,}5-\phi(-2{,}14)=0{,}5+\phi(2{,}14).$$

Согласно табл. П1 [3] для $z = 2{,}14$ $\phi(z) = 0{,}484$.
Тогда $P(t=300) = 0{,}5+0{,}484 = 0{,}984$.

$$Вер(\alpha \le t < \beta)=\phi(\frac{2000-1200}{420})-\phi(\frac{1000-1200}{420})=\phi(1{,}9)-\phi(-0{,}48)=$$
$$=\phi(1{,}9)+\phi(0{,}48)=0{,}471+0{,}184=0{,}655.$$

Наивероятнейшее число наступлений события

Число K_o (наступления событий в независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления событий равна p) называют наивероятнейшим, если вероятность того, что событие наступит в этих испытаниях k раз, превышает или не меньше вероятности остальных возможных исходных испытаний.

Наивероятнейшее число K_o определяется из двойного неравенства

$$np-q \le K_o < np+q. \qquad (2.22)$$

Причем если $np-q$ дробное, то существует одно наивероятнейшее число K_o. Если $np-q$ целое, то существует два наивероятнейших числа K_o и K_o+1; если число np целое, то наивероятнейшее число K_o= np.

В тех случаях, когда вероятность P появления события A из опыта к опыту меняется, определение вероятности появления события A ровно k раз из группы n независимых опытов производится на основании общей теоремы о повторении опытов

$$P_{k,n}=p_1\cdot p_2\cdot\ldots\cdot p_k\cdot q_{k+1}\cdot\ldots\cdot q_n+\ldots+p_1\cdot p_2\cdot p_3\cdot\ldots\cdot q_{n-1}\cdot p_n+$$
$$+\ldots+q_1\cdot q_2\cdot\ldots\cdot q_{n-1}\cdot p_{n-k+1}\cdot\ldots\cdot p_n, \qquad (2.23)$$

т.е. искомая вероятность равна сумме всех возможных произведений, в которых p с разными индексами входит kраз, а q с разными индексами $(n-k)$ раз.

Для того чтобы чисто механически составлять все указанные возможные произведения, используют производящую функцию.

Производящей функцией вероятностей $P_n(k)$ называют функцию, определяемую равенством

$$\varphi_n(z) = (p_1 z + q_1)(p_2 z + q_2)...(p_n z + q_n). \qquad (2.24)$$

Вероятность $P_n(k)$ того, что в n независимых испытаниях, в первом из которых вероятность появления события A равна p_1, во втором – p_2 и т.д., событие появляется ровно k раз, равна коэффициенту при z^k в разложении производящей функции по степени z.

Например, при $n = 2$

$$\varphi_2(z) = (p_1 z + q_1)(p_2 z + q_2) = p_1 p_2 z^2 + (p_1 q_2 + p_2 q_1) z^1 + q_1 q_2.$$

Здесь коэффициент $p_1 p_2$ при z^2 равен вероятности $p_2(2)$ того, что в двух испытаниях событие A появиться 2 раза, коэффициент $p_1 q_2 + p_2 q_1$ при z^1 равен вероятности $p_2(1)$ того, что событие A появиться 1 раз, коэффициент при z^0, т.е. свободный член $q_1 q_2$ равен вероятности $p(0)$ того, что событие A не появиться ни одного раза.

3. СЛУЧАЙНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Внезапные отказы определяются случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов. Случайность связана с тем, что причины события остаются для нас скрытыми. Существенное рассеяние при эксплуатации горных машин и электрооборудования имеют действующие нагрузки, механические характеристики материалов и деталей, зазоры, натяги, критерии ресурсов усталости, износа и т.д.

Поэтому в расчетах надежности многие параметры должны рассматриваться случайными величинами, т. е. такими, которые могут принимать то или иное значение неизвестное заранее. Они могут быть непрерывного дискретностного (прерывистого) типа.

В результате опытов случайные величины получают конкретные реализации.

Дискретная случайная величина X может получить значения $x_1, x_2, ..., x_n$. Каждое из этих значений возможно, но не достаточно, и величина x может принять каждое из них с вероятностью $p_1, p_2, ..., p_n$.

В результате опыта величина X примет одно из значений x, т. е. произойдет одно из полной группы несовместных событий:

$$\left.\begin{array}{l} X = x_1 \\ X = x_2 \\ \ldots\ldots\ldots \\ X = x_n \end{array}\right\}$$

Так как несовместные события образуют полную группу, то

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$$

Эта суммарная вероятность каким-то образом распределена между отдельными значениями.

Если в точности будет указано, какой вероятностью отдает каждое из событий появление конкретных случайной величины, то случайная величина будет полностью описана с вероятной точки зрения.

Соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями, называется *законом распределения случайной величины*.

Наиболее простой формой задания закона распределения дискретных случайных величин является ряд распределения.

Ряд распределения может быть представлен в виде табл. 3.1, в которой против каждого из возможных значений случайной величины $X = x$ указывается соответствующая вероятность P_i.

Таблица 3.1

Ряд распределения

x_i	x_1	x_2	x_3	…	x_{n-1}	x_n
p_i	p_1	p_2	p_3	…	p_{n-11}	p_n

Для наглядности дискретное распределение изображают в виде многоугольника распределения (рис. 3.1)

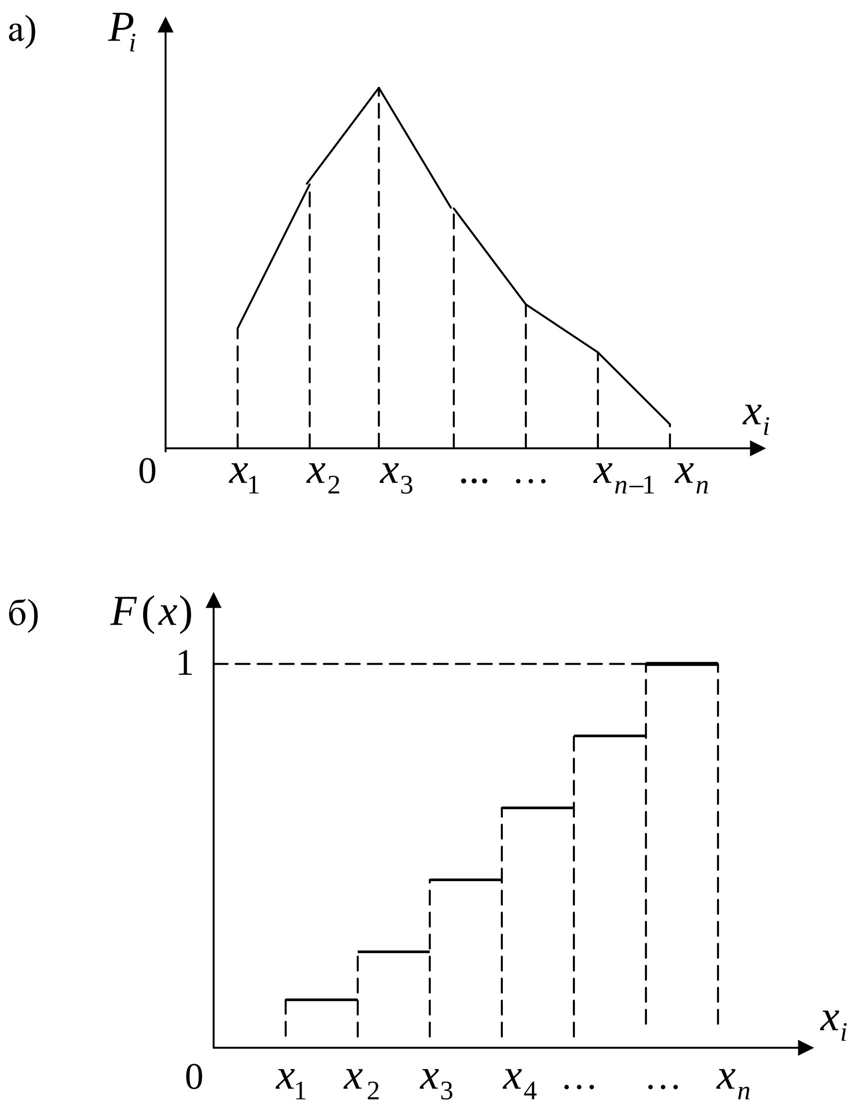


Рис. 3.1. а – многоугольник распределения;
б – график функции распределения (дискретная величина)

Полной и универсальной формой задания закона распределения случайной величины является функция распределения, называемая также интегральной функцией распределения или интегральным законом распределения.

Для дискретных случайных величин функция распределения имеет вид

$$F(x) = \sum_{x_i < X} P(X = x_i), \tag{3.1}$$

где неравенство $x_i < X$ под знаком суммы указывает, что суммирование распространяется на все те значения x_i, которые меньше X.

Когда текущая переменная x проходит через какое-нибудь из возможных значений дискретной величины X, функция распределения меняется скачкообразно, причем величина скачка равна вероятности этого значения. Сумма всех возможных скачков функции $F(x)$ равна единице.

График функции распределения дискретной случайной величины представляет собой ступенчатую кривую. Поскольку для непрерывной случайной величины нельзя перечислить все её возможные значения, то для количественной характеристики непрерывного распределения пользуются не вероятностью события $X = x$, а вероятностью события $X < x$. Функция распределения непрерывной случайной величины X имеет вид

$$F(x) = P(X < x), \tag{3.2}$$

где x – некоторая текущая переменная.

Функция распределения $F(x)$ является неубывающей функцией своего аргумента, т. е. $F(x_2) \geq F(x_1)$ при $x_2 \geq x_1$.

На минус бесконечности функция распределения равна нулю,

$$F(-\infty) = 0. \tag{3.3}$$

На плюс бесконечности функция распределения равна единице,

$$F(+\infty) = 1. \tag{3.4}$$

График функции распределения непрерывной случайной величины представлен на рис. 3.2.

Зная эту функцию распределения случайной величины, легко определить вероятность попадания случайной величины на заданный участок.

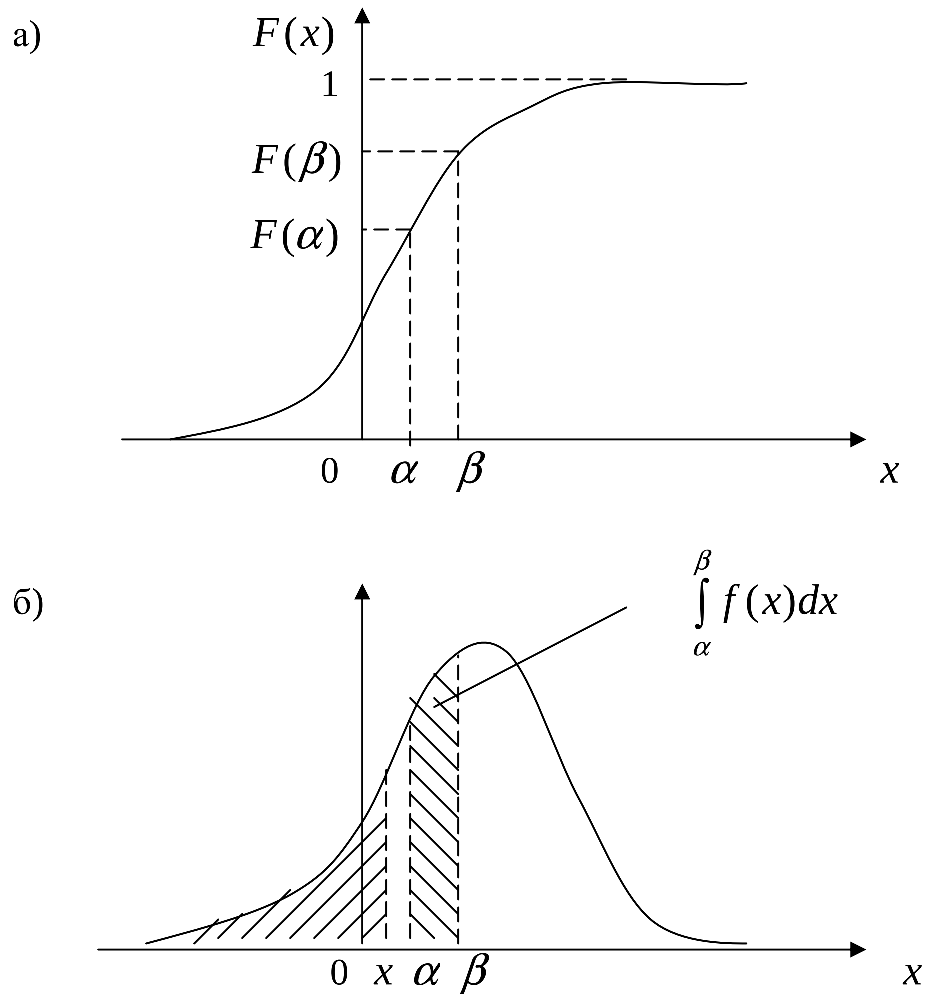


Рис. 3.2. а – график функции распределения;
б – плотность распределения непрерывной случайной величины

При решении практических задач часто оказывается необходимым вычислить вероятность того, что случайная величина примет значение, заключенное в каких-то пределах от α до β. При этом обычно левый конец α включается в участок (α, β), а правый β - не включается. Тогда попадание случайной величины X на участок (α, β) равносильно выполнению неравенства

$$\alpha \le X \le \beta .$$

Вероятность этого события может быть выражена через функцию распределения величины X.

Рассматриваются три события:

событие A: $(X < \beta)$

событие B: $(X < \alpha)$

событие C: $(\alpha \le X < \beta)$

Учитывая, что $A = B + C$, согласно теореме сложения вероятностей

$$P(A) = P(B) + P(C), \tag{3.5}$$

или

$$P(X < \beta) = P(X < \alpha) + P(\alpha \le X < \beta). \tag{3.6}$$

Поскольку $P(X < \beta) = F(\beta)$, а $P(X \le \alpha) = F(\alpha)$, имеем

$$P(\alpha \le X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha), \tag{3.7}$$

т.е. вероятность попадания случайной величины на заданный участок равна приращению функции распределения на этом участке.

Для характеристики непрерывных случайных величин наряду с функцией распределения широко используется плотность вероятности $f(x)$, называемая *дифференциальным законом распределения*

$$f(x) = F'(x). \tag{3.8}$$

График плотности вероятности называется кривой распределения.

Плотность вероятности является неотрицательной функцией $f(x) \ge 0$, так как функция распределения является неубывающей.

Интеграл в бесконечных пределах от плотности вероятности равен единице:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1, \tag{3.9}$$

т.е. площадь, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, равна единице.

Функция распределения может быть выражена через плотность вероятности

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx. \tag{3.10}$$

Геометрически $F(x)$ – площадь под кривой распределения, лежащая левее точки x.

Вероятность попадания величины X на отрезок от α до β выражается через плотность вероятности следующим образом:

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx. \tag{3.11}$$

Геометрически вероятность попадания случайной величины X на участок от α до β равна площади под кривой распределения $f(x)$, ограниченной ординатами в точках α и β.

Для вероятного описания случайных величин широко используются числовые характеристики.

Математическим ожиданием M_x случайной величины, или её средним значением, называется сумма произведений всех возможных значений случайной величины на вероятность этих значений.

Для дискретных случайных величин

$$M(X) = \sum_{i=1}^{n} x_i p_i . \tag{3.12}$$

Для непрерывных случайных величин

$$M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx . \tag{3.13}$$

Модой Mo случайной величины называется то её значение, в которой плотность вероятности максимальна (рис. 3.3).

Медианой Me случайной величины называется такое её значение, для которого одинаково вероятна случайная величина меньше или больше Me (рис. 3.3).

Для характеристики случайных величин используются также *начальные и центральные моменты*.

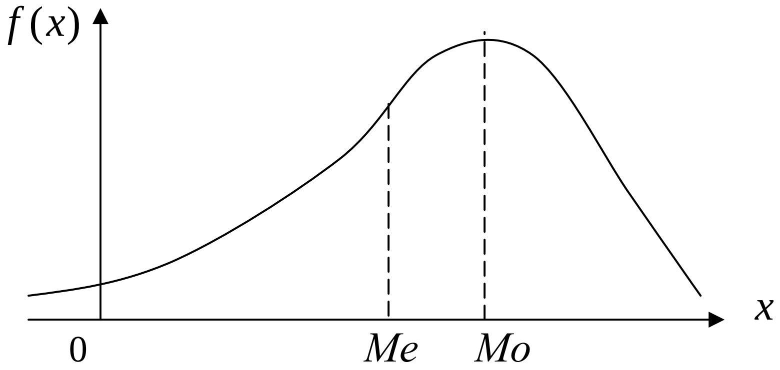


Рис. 3.3. Мода и медиана случайной величины

Начальным моментом k – го порядка дискретной случайной величины X называется сумма вида

$$a_k = \sum_{i=1}^{n} x_i^k p_i . \tag{3.14}$$

Для непрерывной случайной величин

$$a_k = \int_{-\infty}^{\infty} x^k f(x) dx. \tag{3.15}$$

В отличие от начальных моментов центральные относятся к централизованным случайным величинам.

Централизованной случайной величиной $\dot{X}$ называется отклонение случайной величины X от её математического ожидания:

$$\dot{X} = X - M(X). \tag{3.16}$$

Центральные моменты k –го порядка находятся из выражений:

для дискретной случайной величины

$$M_k = \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_x)^k p_i, \tag{3.17}$$

для непрерывной случайной величины

$$M_k = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^k f(x) dx. \tag{3.18}$$

Из всех моментов для характеристики случайных величин чаще всего применяют первый начальный момент a_1, представляющий собой математическое ожидание случайной величины $a_1 = m_x$, и второй центральный момент M_2, называемый дисперсией D_x случайной величины.

Для дискретной случайной величины

$$D(X) = \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_x)^2 p_i \tag{3.19}$$

Для непрерывной случайной величины

$$D(X) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx. \tag{3.20}$$

Дисперсия является характеристикой рассеивания случайной величины, разбросанности её значений около математического ожидания.

Наряду с дисперсией пользуются *средним квадратическим* отклонением случайной величины

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}\,. \qquad (3.21)$$

Отношение вида

$$V_x = \frac{\sigma_x}{m_x} \qquad (3.22)$$

называется *коэффициентом вариации (изменчивости)* случайной величины.

Квантилью называют значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Квантиль, соответствующая вероятности 0,5, называется медианой, т. е. площадь под графиком функции плотности делится медианой пополам.

Для характеристики рассеяния случайной величины используют так же вероятное отклонение, равное половине разностей квантилей $X_{0,75}$ и $X_{0,25}$, т.е. значений случайной величины, соответствующих вероятностям 0,75 и 0,25.

Система двух случайных величин

При решении практических вопросов надежности горных машин возникают задачи, в которых результат опыта описывается не одной случайной величиной, а несколькими.

Функцией распределения системы двух случайных величин (X,Y) называется вероятность совместного выполнения двух неравенств

$$F(x,y) = P\{(X < x)(Y < y)\}. \qquad (3.23)$$

Закон распределения системы непрерывных случайных величин обычно задаётся не функцией распределения, а плотностью вероятности распределения.

Плотность распределения системы двух случайных величин $f(x,y)$ представляет собой вторую смешанную частную производную функции $F(x,y)$ по x и y.

$$f(x,y) = \frac{\partial^2 F(x,y)}{\partial x \partial y} = F''xy(x,y)\,. \qquad (3.24)$$

Плотность распределения системы является неотрицательной функцией

$$f(x,y) \geq 0. \tag{3.25}$$

Двойной интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения системы равен единице

$$\int\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)dxdy = 1 \tag{3.26}$$

Плотность распределения системы двух случайных величин равна плотности распределения одной из величин, входящих в систему, умноженной на условную плотность распределения другой величины, вычисленную при условии, что первая величина приняла заданное значение

$$f(x,y) = f_1(x)\, f(x/y), \tag{3.27}$$

или

$$f(x,y) = f_2(y)\, f(x/y).$$

Для независимых случайных величин, когда закон распределения каждой из них не зависит от того, какое значение приняла другая,

$$f(x,y) = f_1(x)\, f_2(y), \tag{3.28}$$

т.е. плотность распределения системы независимых случайных величин равна произведению плотностей распределения отдельных величин, входящих в систему.

Важной числовой характеристикой системы двух случайных величин является второй смешанный центральный момент k_{xy}, который называется корреляционным моментом (моментом связи) случайных величин X, Y.

Для дискретных случайных величин

$$k_{x,y} = \sum_i \sum_j (x_i - m_x)(y_j - m_y)\, p_{ij}, \tag{3.29}$$

для непрерывных

$$k_{x,y} = \int\int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)(y - m_y)\, f(x,y)dxdy. \tag{3.30}$$

Корреляционный момент описывает кроме рассеивания X и Y ещё и связь между ними.

Для характеристики связи между случайными величинами X и Y в чистом виде используется безразмерная характеристика, называемая коэффициентом корреляции величин X и Y.

$$r_{x,y} = \frac{k_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}. \tag{3.31}$$

Для независимых случайных величин корреляционный момент k_{xy}, а следовательно, и коэффициент корреляции $r_{x,y}$ равны нулю. Такие случайные величины называются некорреляционными.

Если корреляционный момент системы двух случайных величин отличен от нуля, то это является признаком наличия зависимости между ними.

Математическое ожидание суммы двух случайных величин равно сумме их математических ожиданий

$$M(X+Y) = M(X) + M(Y). \tag{3.32}$$

Математическое ожидание произведения двух случайных величин равно произведению их математических ожиданий плюс корреляционный момент:

$$M(XY) = M_x M_y k_{x,y}. \tag{3.33}$$

Дисперсия суммы двух случайных величин равна сумме их дисперсий плюс удвоенный корреляционный момент:

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y) + 2k_{x,y}. \tag{3.34}$$

Для независимых случайных величин

$$M(XY) = M(X) \cdot M(Y); \tag{3.35}$$

$$D(X+Y) = D(X) + D(Y); \tag{3.36}$$

$$D(XY) = D(X)D(Y) + M_x^2 D(Y) + M_y^2 D(X). \tag{3.37}$$

4. СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

4.1. Способы задания дискретных случайных величин

При решении различных задач надёжности используются законы распределения вероятностей как дискретных, так и непрерывных случайных величин.

Наиболее часто используемыми распределениями для дискретных случайных величин являются биноминальное распределение и распределение Пуассона.

Биноминальным распределением называется закон распределения случайной величины X – числа k появлений события в n независимых испытаниях, в каждом из которых вероятность появления события равна P.

Вероятность появления каждого из возможных значений $X = k$ (где k – число появления события) вычисляется по формуле Бернулли

$$Pn(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k}. \tag{4.1}$$

Если число испытаний велико, а вероятность появления событий в каждом испытании мала, то используется формула

$$Pn(k) = \frac{a^k \lambda^{-a}}{k!}, \tag{4.2}$$

где k – число появлений события в n независимых испытаниях; $a = n \cdot p$ - среднее число появлений события в n испытаниях.

Распределение дискретной случайной величины X, описываемой формулой (4.2), называется распределением Пуассона.

4.2. Способы задания непрерывных случайных величин

Наиболее часто используемые законами распределения непрерывных случайных величин, характеризующих надежность изделий и их элементов, являются: экспоненциальный, нормальный, логарифмически-нормальный и распределение Вейбулла.

Надежность в период нормальной эксплуатации. В этот период постепенные отказы ещё не появляются, и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от возраста изделия

$$\lambda(x) = \lambda = const \qquad (4.3)$$

где, $\lambda = 1/m_x$; m_x - математическое ожидание случайной величины (обычно в часах).

Вероятность безотказной работы

$$P(x) = e^{-\int_0^x \lambda dx} = e^{-\lambda x} \qquad (4.4)$$

Она подчиняется экспоненциальному закону распределение времени безотказной работы и одинакова за любой период времени нормальной эксплуатации.

Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать время безотказной работы широкого круга объектов: высокопроизводительных механизированных очистительных и проходческих комплексов, экскаваторов и др. в период после приработки и до существенного проявления постепенных отказов.

Существенное достоинство экспоненциального распределения, его простота, оно имеет только один параметр.

При экспоненциальном законе плотность распределения (плотность вероятности) случайной величины описывается формулой

$$f(x) = \frac{1}{m_x} e^{-\frac{x}{m_x}}, \qquad (4.5)$$

где m_x - математическое ожидание случайной величины.

Среднее квадратическое отклонение σ_x случайной величины X, распределённой по экспоненциальному закону, равно её математическому ожиданию m_x, т.е. коэффициент вариации v=1.

Функция экспоненциального распределения имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{m_x} \int_0^x e^{-\frac{x}{m_x}} dx = 1 - e^{-\frac{x}{m_x}} \qquad (4.6)$$

Графики плотности вероятности $f(x)$ и функции $F(x)$ экспоненциального закона представлены на рис. 4.1.

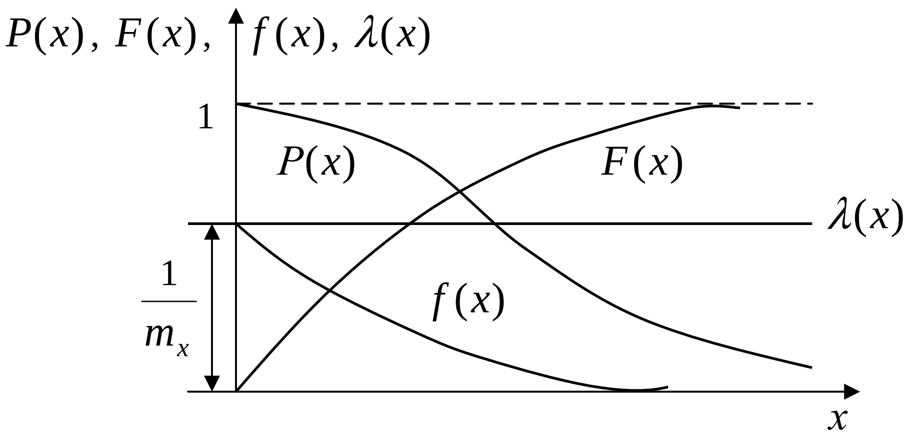


Рис. 4.1. Функция и плотность вероятности и интенсивность отказов закона распределения

Например, оценить вероятность $P(x)$ отсутствие внезапных отказов проходческого комбайна в течение 10000 ч, если интенсивность отказов

$\lambda = 1/m_x = 10^{-8}$ ч$^{-1}$

$P(x) = e^{-\lambda x} = 0{,}9999.$

Если $\lambda(x) \le 0{,}1$, то $P(x) = 1 - \lambda x = 1 - 10^4 \cdot 10^{-8} = 1 - 0{,}0001 = 0{,}9999.$
Расчет даёт точное совпадение.

Для постепенных (износовых) отказов нужны законы распределения времени безотказной работы, которые дают низкую плотность распределения.

В связи с многообразием причин и условий возникновения отказов в этот период для описания надежности применяют наиболее универсальное распределение – нормальное.

Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие примерно равнозначные факторы.

Нормальному распределению подчиняется наработка до отказа многих восстанавливаемых и невосстанавливаемых деталей, размеры и ошибки измерений и т. д.

Нормальное распределение характеризуется плотностью вероятности вида

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} \tag{4.7}$$

Пределы изменения случайной величины X:

$$-\infty < X < +\infty.$$

Функция нормального распределения описывается формулой

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \qquad (4.8)$$

где $z = \frac{x - m_x}{\sigma_x}$.

Так как интеграл

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0{,}5, \quad \text{то}$$

$$F(x) = 0{,}5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{x} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0{,}5 + \Phi(z), \qquad (4.9)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{x} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ - нормальная функция Лапласа.

$\Phi(z)$ является нечетной функцией, т.е. $\Phi(-z) = \Phi(z)$.

Вероятность попадания случайной величины в заданный интервал $[\alpha, \beta]$ равна

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi(\frac{\beta - m_x}{\sigma_x}) - \Phi(\frac{\alpha - m_x}{\sigma_x}) \qquad (4.10)$$

Для нормального закона распределения

$$P(m_x - 3\sigma_x < x < m_x + 3\sigma) = 0{,}997,$$

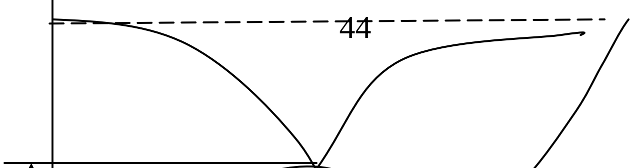
т.е. вероятность отклонения случайной величины от ее математического ожидания за пределы 3σ очень мала и составляет всего лишь 0,3 % (рис. 4.2).

Сближение параметров и оценок увеличивается с увеличением числа испытаний.

Математическое ожидание определяет на графике положение петли, а среднее квадратическое отклонение – ширину петли (рис. 4.3).

Кривая плотности распределения, тем острее и выше, чем меньше σ_x квантиль нормального сопротивления

$$U_p = (x - m_x) / \sigma \qquad (4.11)$$



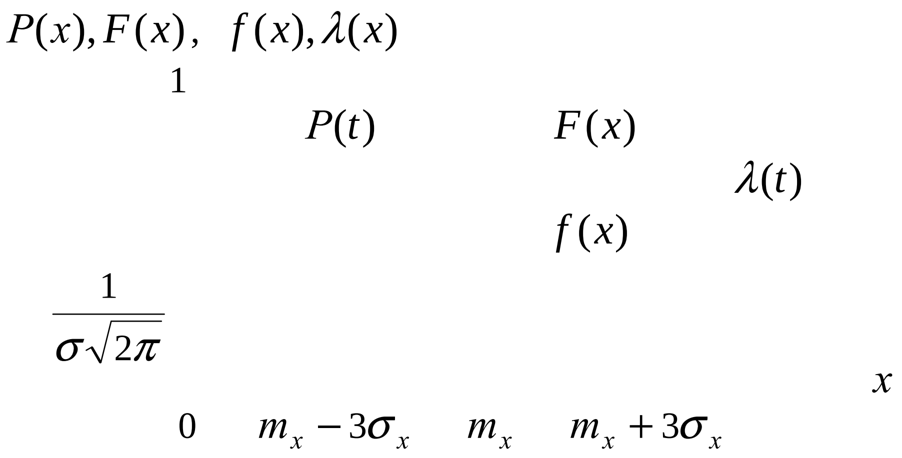


Рис. 4.2. Графики функции, плотности, вероятности и распределения отказов нормального распределения

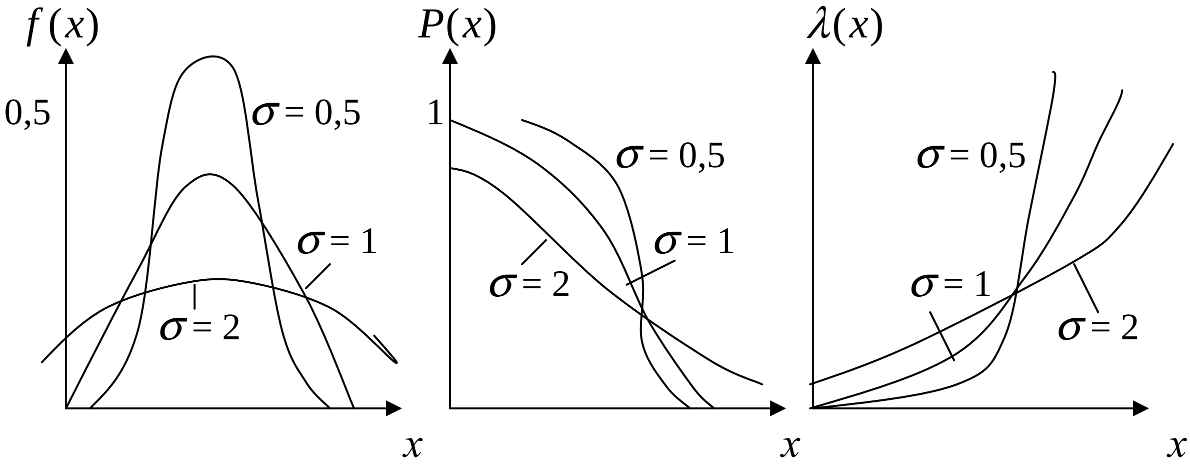


Рис. 4.3. Основные характеристики нормального распределения при разных значениях среднего квадратического отклонения

Например, определить вероятность $P(t)$ безотказной работы в течение t = $1{,}5\cdot10^4$ ч изнашиваемого подвижного сопряжения, если ресурс подчиняется нормальному распределению с параметрами $m_t = 4\cdot10^4$ ч, $\sigma = 10^4$ ч.

Находим квантиль $U_p = \dfrac{1{,}5\cdot10^4 - 4\cdot10^4}{10^4}$ = 2,5.

По табл.П6 находим $P(t)$ = 0,9938.

В теории надежности широко используется усеченное нормальное распределение, получаемое из нормального при ограничении интервала возможных значений случайной величины x_1, x_2. Оно в частности, вносит уточнения в расчеты надежности, по сравнению с нормальным распределением при больших значениях коэффициента вариации $V = \sigma / m_x$.

Плотность вероятности $f)x)$ усеченного нормального распределения равна

$$f'(x) = cf(x),$$

где c – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой распределения равна единице

$$c = \frac{1}{\Phi(U_2) - \Phi(U_1)}, \tag{4.12}$$

где $U_1 = \dfrac{x_1 - m_x}{\sigma_x}$, $U_2 = \dfrac{x_2 - m_x}{\sigma_x}$.

Когда возможные значения случайной величины X лежат в интервале $(0,+\infty)$

$$c = \frac{1}{0{,}5 + \Phi(\frac{m_x}{\sigma_x})}.$$

Примером усеченных распределений может быть распределение параметра качества изделий после отбраковки части изделий по этому параметру.

В логарифмически нормальном распределении логарифм случайной величины распределяется по нормальному закону. Как распределение положительных величин, оно несколько точнее чем нормальное, описывает наработку до отказа деталей, в частности по усталости деталей (подшипников качения, электронных ламп и др.)

Логарифмически нормальное распределение удобно для случайных величин, представляющих собой произведение значительного числа случайных исходных величин, подобно тому, как нормальное распределение удобно для суммы случайных величин.

При логарифмически-нормальном законе логарифм случайной величины X распределен по нормальному закону.

Плотность вероятности имеет вид

$$f(x) = \frac{M}{x\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg x - \lg m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \tag{4.13}$$

где M = 0,4343 – коэффициент перехода от натуральных логарифмов к десятичным; σ_x - средне квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

Вероятность безотказной работы можно определить по таблицам для нормального распределения в зависимости от значения квантили

$$U_p = (\ln x - m_x)/\sigma .$$

Например, определить вероятность $P(x)$ отсутствие усталостных повреждений вала в течение t = 10^4 ч, если ресурс распределен логарифмически нормально с параметрами $\lg m_x$ = 4,5; σ_x = 0,25.

$$P(t) = F_o(\frac{\lg x - \lg m_x}{\sigma}) = F_o(\frac{\lg 10^4 - 4{,}5}{0{,}25}) = 0{,}9772.$$

Распределение Вейбулла довольно универсально, охватывает путем варьирования параметров широкий диапазон случаев изменения вероятностей. Вместе с логарифмически нормальным распределением оно удовлетворительно описывают наработку деталей по усталостным разрушениям. Используется для оценки надежности деталей и узлов автомобилей, тракторов, подъемных машин и всех видов транспортных машин.

Распределение Вейбулла имеет плотность вероятности типа (рис. 4.3)

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x^{\alpha}}{\beta}}, \qquad (4.14)$$

и функцию распределения

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{x^{\alpha}}{\beta}}. \qquad (4.15)$$

Параметры распределения α и β находятся по формулам

$$\alpha = \frac{\ln\ln\left[\frac{1}{1 - J(R_1}\right] - \ln\ln\left[\frac{1}{1 - J(R_2)}\right]}{\ln R_1 - \ln R_2};$$

$$\beta = \frac{R_1^2}{\ln\left[\frac{1}{1 - J(R_1)}\right]}.$$

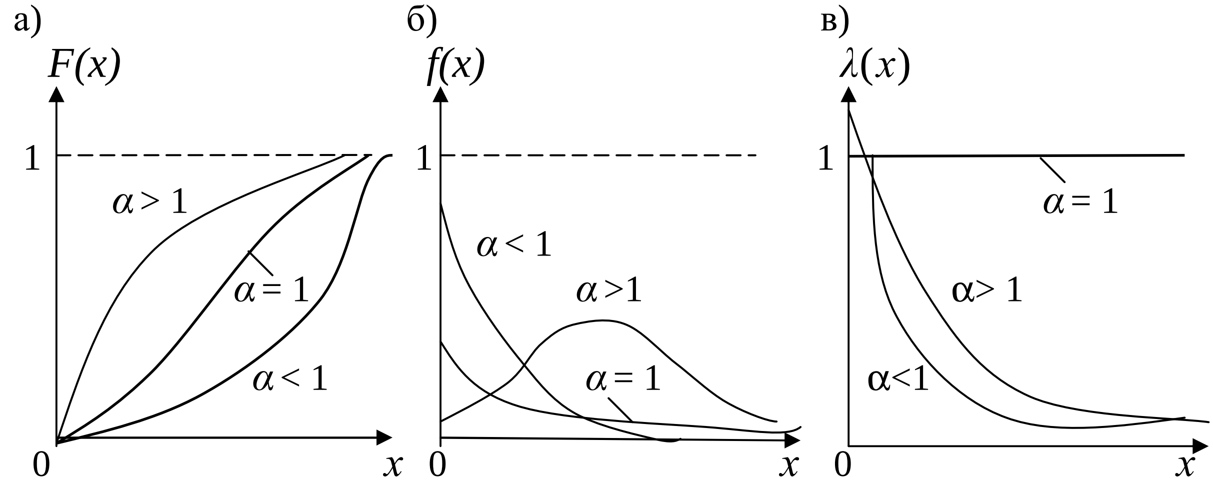


Рис. 4.3. Функция (а), плотность (б) и интенсивность (в) распределения Вейбулла

Правила пользования этими формулами можно уяснить на примере. Данные для расчета следующие:

Длительность испытаний, ч	Количество отказавших элементов, шт.	Доля отказавших элементов
90	26	0,26
200	36	0,36
500	44	0,44
900	57	0,57
1500	77	0,77
2100	79	0,79
4300	87	0,87

Проведены испытания партии элементов в количестве N = 100 шт.

Выбираем границы разбиения R_1 и R_2 опытных данных таким образом, что $R_1 < R_2$.

Пусть R_1= 200 ч и R_2 = 2100 ч. Далее подсчитывается количество элементов n_i, отказавших в диапазонах $O - R_1$ и $O - R_2$. Эти количества равны соответственно $O - R_1$= 36 и $O - R_2$ = 79.

Затем находятся отношения $J(R_1) = \dfrac{n(R_1)}{N}$; $J(R_2) = \dfrac{n(R_2)}{N}$, т.е. доля отказавших элементов к моментам времени R_1 и R_2.

В рассматриваемом примере $J(R_1)$= 0,36; $J(R_2)$= 0,79.

Значения $J_1(x) = \ln\frac{1}{1-x}$ и $J_2(x) = \ln\ln\frac{1}{1-x}$ находят по таблицам (α = 0,532; β = 37,6).

Для приближенной оценки параметров Вейбулла можно использовать вероятностную бумагу.

Пример. Определить вероятность безотказной работы $P(x)$ роликоподшипников x = 10^4, если ресурс подшипников описывается распределением Вейбулла с параметрами β = 10^7 ч, α = 1,5.

$$P(x) = e^{-x^{\alpha}/\beta} = e^{-10^4 \cdot 1,5/10^7} = 0,905.$$

При совместном действии внезапных и постепенных отказов вероятность безотказной работы изделия за период t, если до этого оно проработало время T, по теореме умножения равна

$$P(t) = P_в(t)P_п(t), \tag{4.16}$$

где $P_в(t) = e^{-\lambda t}$ и $P_п(t) = P_п(T+t)/P_п(T)$ - вероятности отсутствия внезапных и постепенных отказов.

Для системы из последовательно соединенных элементов вероятность безотказной работы за период t равна

$$P_{ст}(t) = e^{-t\sum\lambda} \varPi \frac{P_{пi}(T+t)}{P_{пi}(T)}, \tag{4.15}$$

где $\sum$ и $\varPi$ - это сумма и произведение. Для новых изделий T = 0 и $P_{пi}(T)$ = 1.

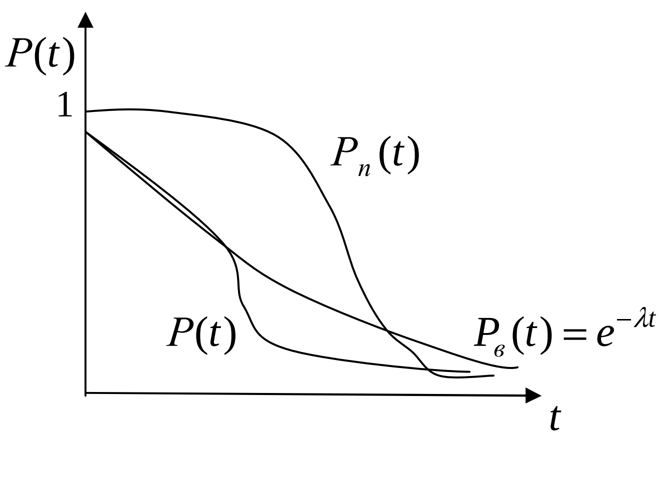


Рис. 4.4. Совместное действие внезапных и постепенных отказов

На рис. 4.4. показаны кривые вероятности отсутствия внезапных отказов, постепенных отказов и кривая вероятности безотказной работы. Вначале, когда интенсивность постепенных отказов низка кривая соответствует кривой $P(t)$, а потом резко снижается.

В период постепенных отказов их интенсивность, как правило, многократно выше, чем внезапных. ,

5. ОСОБЕННОСТИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

5.1. Формирование потока отказов

У невостонавливаемых изделий рассматривают первичные отказы, у восстанавливаемых – первичные и повторные.

Для восстанавливаемых изделий показан график эксплуатации восстанавливаемых изделий (рис. 5.1).

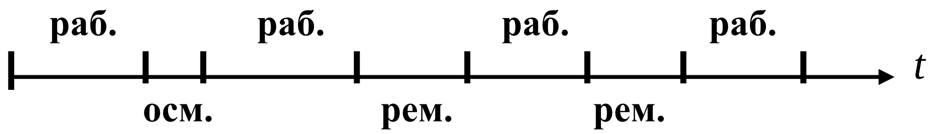


Рис. 5.1. График эксплуатации

С течением времени периоды работы между ремонтами становятся короче, а периоды ремонта и профилактики возрастают.

Надежность различных средств механизации определяется уровнем надежности входящих в них элементов и способом взаимодействия элементов, от которого зависит результирующая величина параметра потока отказов.

Потоком отказов является последовательность отказов объекта, возникающих один за другим в какие-то моменты времени.

Для количественной характеристики потока отказов восстанавливаемых объектов, к которым относятся различные средства механизации горных работ, используется параметр потока отказов, величина которого определяется на основании статистических данных. Параметр потока отказа характеризует среднее число отказов объекта в единицу времени, взятое для рассматриваемого объекта в единицу времени:

$$\omega(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{\Delta t}, \qquad (5.1)$$

где $\omega(t)$ – параметр потока отказов, ч $^{-1}$; $n(t)$ и $n(t + \Delta t)$ – число отказов объекта соответственно к моменту времени t и $t + \Delta t$.

Для различных средств механизации горных работ характерно последовательное взаимодействие элементов, при котором отказ любого элемента является необходимым и достаточным условием отказа всей системы (рис. 5.2).

Если отказ каждого элемента является случайным независимым событием и известны вероятности безотказной работы элементов $p_1(t)$ в течение требуемого времени t, то вероятность безотказной работы системы

$P(t)$ определяется согласно теореме умножения вероятностей для независимых событий

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} p_i(t), \tag{5.2}$$

где N – число последовательно взаимодействующих элементов.

Из формулы (5.2) видно, что с ростом числа последовательно взаимодействующих элементов вероятность безотказной работы снижается при всех прочих условиях работы.

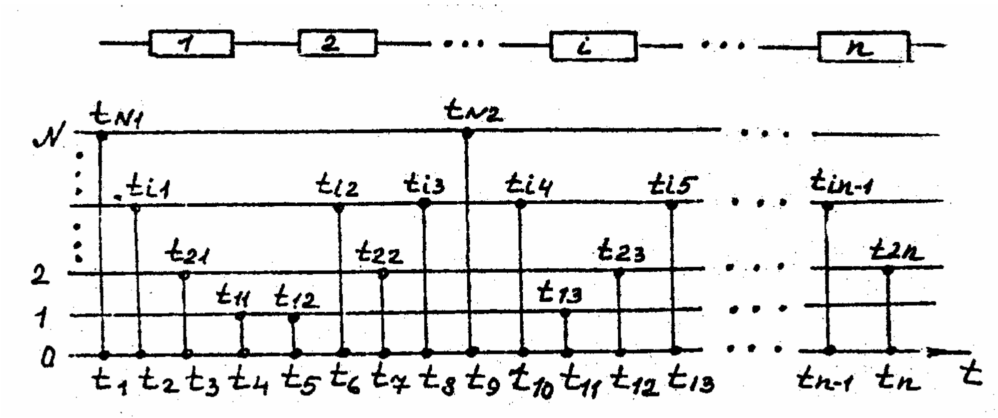


Рис. 5.2. Поток отказов элементов системы

При последовательном взаимодействии все элементы работают одновременно и, как видно из схемы формирования потока отказов, результирующий поток отказов системы по оси t представляет собой суперпозицию потока отказов всех элементов.

В этом случае наработка на отказ T_o системы за время t' составит

$$T_o = \frac{t'}{n_1 + n_2 + ... + n_i + ... + n_N}, \tag{5.3}$$

где $n_1, n_2, ..., n_i, ...n_N$ - число отказов элементов системы.

В свою очередь

$$T_{o1} = t'/n_1; \quad T_{o2} = t'/n_2; \ ...; \\ T_{oi} = t'/n_i; \ ...; \quad T_{oN} = t'/n_N, \tag{5.4}$$

откуда

$$n_1 = t'/T_{o1}; \ n_2 = t'/T_{o2}; \ ...; \ n_i = t'/T_{oi}; \ ...; \ n_N = t'/T_{oN}. \tag{5.5}$$

Подставив эти значения в формулу (5.3), получим

$$T_o = \left(\sum_{i=1}^{N} T_{oi} \right)^{-1} . \qquad (5.6)$$

Как известно, при внезапных отказах изделия закон распределения наработки до отказа экспоненциальной с интенсивностью λ. Если изделие при отказе заменяют новым (восстанавливаемое изделие), то образуется поток отказов параметр которого

$$\omega(t) = const = 1/T .$$

Для горных машин, комплексов и агрегатов, состоящих из большого числа элементов, имеющих в отдельности малые величины параметра потока отказов, результирующий поток отказов будет близок к простейшему после периода приработки объекта.

Важнейшими свойствами простейшего или пуассоновского потока отказов является стационарность, ординарность и отсутствие последствия.

Стационарность потока означает, что вероятность возникновения какого-либо числа k отказов объекта в интервале времени Δt не зависит от положения этого интервала на оси $(0, t)$.

Ординарность потока означает, что вероятность одновременного наступления двух или более отказов пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью наступления одного отказа.

Отсутствие последействия заключается в том, что вероятность наступления k отказов в интервале Δt не зависит от того, какое число отказов произошло до этого интервала времени.

Для простейшего потока отказов величина параметра потока отказов $\omega(t) = \omega = const$ и равна обратной величине наработки объекта на отказ, т.е. $\omega = 1/T_0$.

Тогда для N последовательно взаимодействующих элементов получим

$$\omega = \sum_{i=1}^{N} \omega_i , \qquad (5.7)$$

где ω, ω_i - параметры потока отказов соответственно системы средств механизации горных работ и i-го элемента, ч$^{-1}$.

Случайные значения наработок системы между отказами подчиняются в этом случае экспоненциальному закону распределения, а вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-t/T_0} = e^{-\omega t}. \qquad (5.8)$$

Самостоятельное рассмотрение постепенных отказов восстанавливаемых изделий представляет интерес, потому что время восстановления после постепенных отказов обычно существенно больше, чем после внезапных.

При совместном действии внезапных и постепенных отказов обычно существенно больше, чем после внезапных.

Поток постепенных (износовых) отказов становится стационарным при наработке t, значительно больше среднего значения T. Так, при нормальном распределении наработки до отказа интенсивность отказов возрастает монотонно, а параметр потока отказов сначала возрастает, а потом начинаются колебания, которые затухают на уровне $1/T$. Наблюдаемые максимумы $\omega(t)$ соответствует средней наработке до отказа первого, второго, третьего и т.д. поколений деталей.

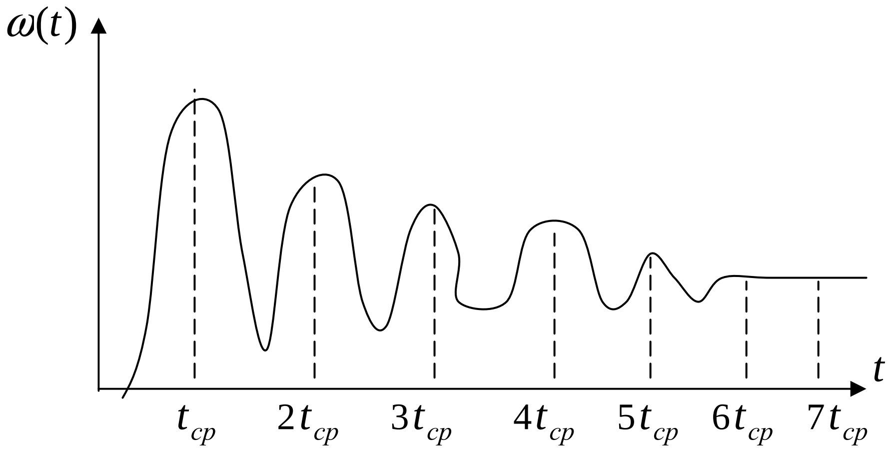


Рис. 5.3. График частоты отказа объектов с последовательной заменой после отказа

В сложных изделиях параметров потока отказов как сумма параметров потоков отказов. Составляющие потоки можно рассматривать по узлам или типам устройств, например гидравлическим, электрическим, механическим и д.р.

5.2. Структурные формулы надежности средств механизации горных работ

Уровень надежности различных средств механизации горных работ зависит от надежности и состава функциональных машин, а также от вида и надежности связей, объединяющих различные функциональные машины для совместной работы.

Выемочная «В», доставочная «Д», механизированная крепь «К» - основные функциональные машины системы забойного оборудования – могут объединяться для совместной работы в системах с помощью технологических «–», кинематических «+» и конструктивных «·» связей.

Технологическая связь осуществляется согласованием с технологическим процессом обособленных машин для их целесообразного сочетания, т.е. является логической связью, на базе которой образуются наборы машин называемые выемочными комплексами.

Базовой структурной формулой для комплекса является

$$В - Д - К. \tag{5.9}$$

Для учета влияния технологической связи на уровень надежности контакта машин ее целесообразно представить в виде параллельной технологической связи «||» при параллельной (одновременной) работе функциональных машин, либо в виде последовательно технологической связи «→» при последовательности функционирования машин. Таким образом, из базовой формулы могут быть получены сочетания

$$(В \to Д) \parallel К; \quad (В \to В \parallel Д) \parallel К; \quad В \parallel Д \parallel К, \tag{5.10}$$

которые описывают следующие комплекты машин: врубовую, доставочную, крепь; врубонавалочную, доставочную, крепь; широкозахватный комбайн, доставочную крепь.

Функцию крепления призабойного пространства крепь осуществляет непрерывно, поэтому технологическую связь крепи с любой другой функциональной машины может быть только параллельной.

Структурные формулы комплектов машин с вырожденными элементами имеют вид

$$В \to Д; \quad В \to В \parallel Д; \quad В \parallel Д; \quad В \parallel К; \quad Д \parallel К. \tag{5.11}$$

При параллельной технологической связи функциональных машин потоки их отказов накладываются друг на друга, и, следовательно, расчет показателей безотказности комплектов машин с параллельными технологическими связями должен осуществляется по формулам (5.3) – (5.8) для случаев последовательного взаимодействия элементов в системе.

При последовательной технологической связи функциональных машин потоки их отказов продолжают друг друга (рис. 6.2).

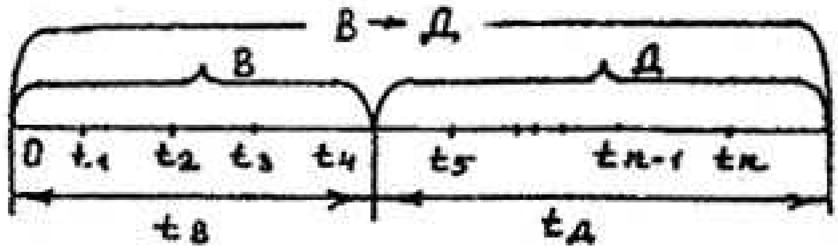


Рис.5.4. Последовательная технологическая связь функциональных машин

В этом случае параметр потока отказов системы машин в каждый конкретный период времени равен параметру потока отказов какой-либо функциональной системы и для достаточно длительного периода работы системы

$$\omega = \sum_{i=1}^{N} \omega_i \frac{t_i}{t}, \qquad (5.12)$$

где N' - число последовательно работающих во времени функциональных машин; t_i - время работ □ - ой функциональной машины за период $t = \sum_{i=1}^{N} t_i$.

При простейшем потоке отказов каждой функциональной машины $\omega_i = 1/T_{oi}$ наработка на отказ системы машин с последовательными технологическими связями

$$T_o = \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{t_i}{T_{oi}} \right)^{-1}, \qquad (5.13)$$

где T_{oi} - наработка на отказ □ - ой функциональной машины.

Формулы (5.9) и (5.11) определяют структуру средств механизации, т.е. состав функциональных элементов системы, а также способ взаимодействия элементов, влияющий на процесс формирования потока отказов всей системы. Поэтому они называются структурными формулами надёжности.

Сама технологическая (логическая) связь не является источником отказов, хотя и влияет на способ расчета безотказности системы машин.

Кинематическая связь осуществляется сочленением технологически согласованных и сохранивших свою индивидуальность функциональных машин и ведет к образованию системы машин, называемых выемочными комплексами.

Сочленения машин требуют увязки скоростей и направлений взаимного перемещения различных функциональных машин и ведут к образованию системы машин, называемых выемочными комплексами.

Конструктивная связь осуществляется совмещением базовых элементов, согласованных на основе параллельной технологической связи и кинематически увязанных функциональных машин, и ведет к образованию оборудования, называемого выемочными агрегатами.

Конструктивная связь обуславливает изменение конструкции индивидуальных машин и потерю ими обособленности.

В отличие от технологической, кинематическая и конструктивная связи являются материальными связями, поэтому они, предопределяя последовательное в плане надежности взаимодействие элементов в системе (при параллельной их работе), участвуют наряду с функциональными машинами (органами) в формировании величины параметра потока отказов средств механизации горных работ в целом:

$$\omega = \sum_{i=1}^{N} \omega_{ф.i} + \sum_{j=1}^{M} \omega_{к.с.j} \qquad (5.14)$$

где N – число функциональных машин органов выемочного комплекса или агрегата; M – число математических связей (кинематических и конструктивных) между функциональными машинами; $\omega_{ф.i}$ - параметр потока отказов i-ой машины; $\omega_{к.с.j}$ - параметр потока отказов j-ой кинематической или конструктивной связи.

Число и тип функциональных машин, а также вид связи между ними определяются структурными формулами надежности средств механизации.

Структурные формулы имеют вид:

для выемочных полукомлексов – систем машин, у которых между функциональными машинами имеется не только кинематическая, но и технологическая связь

$$В \parallel Д + К, \quad В + Д \parallel К, \quad В \parallel К + Д;$$

для выемочных комплексов с полным набором функциональных машин с вырожденными элементами

$$В + Д + К, \quad В + Д, \quad В + К, \quad Д + К;$$

для выемочных полуагрегатов, у которых между функциональными машинами (органами) имеется не только конструктивная, но и технологическая или кинематическая связь

$$В \parallel Д \cdot К, \quad В \cdot Д \parallel К, \quad В \parallel К \cdot Д,$$
$$В + Д \cdot К, \quad В \cdot Д + К, \quad В + К \cdot Д;$$

для выемочных агрегатов с полным набором функциональных органов и с вырожденными элементами

$$B \cdot Д \cdot К, \quad B \cdot Д, \quad Д \cdot К, \quad B \cdot К.$$

Для средств механизации горных работ, описываемых этими структурными формулами, выражения для определения наработки на отказ T_0 и вероятности безотказной работы $p(t)$ систем забойного оборудования в целом имеют вид

$$T_o = \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{T_{o(ф.i)}} - \sum_{j=1}^{M} \frac{1}{T_{o(к.с.j)}} \right]^{-1}, \tag{5.15}$$

$$P(t) = \prod_{i=1}^{N} P_{ф.i}(t) \prod_{j=1}^{M} P_{к.с.j}(t), \tag{5.16}$$

где $T_{o(ф.i)}$, $P_{ф.i}(t)$ - наработка на отказ и вероятность безотказной работы i-ой функциональной машины; $T_{o(к.с.j)}$, $P_{к.с.j}(t)$ - наработка на отказ и вероятность безотказной работы j-ой кинематической или конструктивной связи; N, M – число соответственно функциональных машин и материальных связей.

Эти формулы при $M = 0$ могут быть также использованы для расчета величины показателей безотказности комплексов машин с параллельными технологическими связями.

5.3. Анализ структурных состояний средств механизации горных работ

Современные выемочные комплексы и агрегаты являются многофункциональными техническими системами. Структурные элементы комплексов и агрегатов для очистных работ кроме основной функции средств механизации – выемки угля выполняют функции крепления забоя и управления кровлей, передвижки доставочной машины на новую дорогу, обеспечения безопасных условий труда в забое.

В зависимости от схемы работы машин комплекса и агрегата, их конструктивных особенностей в различные моменты времени может функционировать различное число структурных элементов. Различные структурные состояния обусловлены необходимостью выполнения не только основных, но и вспомогательных механизированных операций, не совмещенных с процессом выемки полезного ископаемого, постоянным выполнением крепью функции крепления рабочего пространства, а также дополнительным функционированием доставочной машины в связи с необходимостью выдачи угля из ниш (при отсутствии самозарубающихся машин) и доставки в очистной забой материалов и запасных частей.

Процесс функционирования средств механизации представляет собой случайное чередование различных структурных состояний выемочных комплектов, комплексов, агрегатов и других систем выемочного оборудования и может быть рассчитан при помощи структурных формул надежности соответствующих средств механизации с учетом дополнительных состояний убывающего числа одновременно работающих функциональных систем.

Так, для комплекта машин, имеющих структурную формулу надежности $В \parallel Д \parallel К$, логическая формула возможных структурных состояний имеет вид $В\ и\ Д\ и\ К$ или $В\ и\ К$ или $К$. Для очистного механического комплекса $В + Д + К$ логической формулой структурных состояний является $В + Д + К$ или $В + К$ или $К$.

Логическая связка «и» в формулах возможных структурных состояний средств механизации заменяет условное обозначение параллельной технологической связи ($\parallel$) в структурных формулах надежности и указывает на одновременное функционирования различных машин. Связка «или» указывает на совместимость во времени различных структурных состояний средств механизации. Для агрегата $В \cdot Д \cdot К$ логическая формула будет иметь вид $В \cdot Д \cdot К$ или $Д \cdot К$ или $К$.

Вероятность безотказного функционирования системы забойного оборудования с учетом различных возможных структурных состояний может быть определена по формуле полной вероятности как сумма произведенной вероятности каждого структурного состояния на вероятность безотказной работы системы в соответствующем структурном состоянии.

$$P(t) = \sum_{j=1}^{r} k_{tj} \prod_{i=1}^{N_j} P_{(ф.i)j}(t_j) \prod_{k=1}^{N_j} P_{(к.с.к)j}(t_j) \qquad (5.17)$$

где r - число возможных структурных состояний системы машин; k_{tj} - стационарная вероятность пребывания системы в j-ом структурном состоянии, численно равная времени нахождения в этом структурном состоянии; $P_{(ф.i)j}(t_j)$ - вероятность безотказной работы i-ой функциональной машины в j-ом структурном состоянии; N_j - число функциональных машин, одновременно работающих в j-ом структурном состоянии; $P_{(к.с.к)j}(t_j)$ - вероятность безотказной работы кинематической или конструктивной связи в k-ом структурном состоянии; M_j - число материальных связей между функциональными машинами в j-ом структурном состоянии.

Пример. Структурная формула надежности системы забойного оборудования $B + Д + К$, длина очистного забоя L = 140 м. Показатели надежности машин и элементов аналогов: $T_{0(B)}$ = 7 ч; $T_{0(Д)}$ = 6 ч; $T_{0(C)}$ =1420 ч; $T_{0(ЭК)}$ = 80 ч; $T_{0(+)}$ = 60 ч; $T_{B(B)}$ = 0,6 ч; $T_{B(Д)}$ = 0,65 ч; $T_{B(C)}$ = 2 ч; $T_{B(ЭК)}$ = 1,2 ч; $T_{B(+)}$ = 0,8 ч. Шаг установки секций крепи l_C = 1,4 м.

Требуется найти $T_{0(B+Д+К)}$, $T_{B(B+Д+К)}$, $К_{Г(B+Д+К)}$.

$$T_{0(К)} = \left[\frac{L}{l_C} \cdot \frac{1}{T_{0(C)}} + \frac{1}{T_{0(ЭК)}}\right]^{-1}; \; T_{B(К)} = T_{0(К)}\left[\frac{L}{l_C} \cdot \frac{T_{B(C)}}{T_{0(C)}} + \frac{T_{B(ЭК)}}{T_{0(ЭК)}}\right];$$

$$T_{0(К)} = \frac{1}{\frac{140}{1,4} \cdot \frac{1}{1420} + \frac{1}{80}} = \frac{1}{0,07 + 0,0125} = \frac{1}{0,0825} = 12,124;$$

$$T_{B(К)} = 12,12\left(\frac{140}{1,4} \cdot \frac{2}{1420} + \frac{1,2}{80}\right) = 12,12(0,1408 + 0,015) = 1,894.$$

$$T_{0(сист)} = \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{T_{0(ф.i)}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{1}{T_{0(к.с.j)}}\right]^{-1};$$

$$T_{B(сист)} = T_{0(сист)}\left[\sum_{i=1}^{N} \frac{T_{B(ф.i)}}{T_{0(ф.i)}} + \sum_{j=1}^{M} \frac{T_{B(к.с.j)}}{T_{0(к.с.i)}}\right];$$

$$К_Г = \frac{T_{0(сист)}}{T_{0(сист)} + T_{B(сист)}}$$

$$T_{0(B+Д+К)} = \frac{1}{\frac{1}{7} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12,12} + \frac{1}{60}} = \frac{1}{0,3937} = 2,54 \text{ ч.}$$

$$T_{B(B+Д+К)} = 2,54\left(\frac{0,6}{7} + \frac{0,65}{6} + \frac{1,89}{12,12} + \frac{0,8}{6,8}\right) = 2,54 \cdot 0,363 = 0,92 \text{ ч.}$$

$$К_{Г(B+Д+К)} = \frac{2,54}{2,54 + 0,92} = \frac{2,54}{3,46} = 0,734.$$

Пример. В системе, состоящей из 4 элементов за суммарную наработку машины $t_{сум}$ = 186 ч произошло 6 отказов различных элементов n_1 = 1; n_2 = 3; n_3 = 2; n_4 = 0, среднее время восстановления отказа для каждого элемента T_B = 65 ч, T_{B2} = 75 ч, T_{B3} = 70 ч, T_{B4} = 0. Определить среднюю на работку отказ системы $T_{0(сист)}$, среднее время восстановления системы $T_{B(сист)}$ и коэффициент готовности системы.

$$T_{0(сист)} = \frac{t_{сум}}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = \frac{186}{1+3+2+0} = \frac{186}{6} = 31 \text{ ч.}$$

$$T_{B(сист)} = \frac{T_{B1} \cdot n_1 + T_{B2} \cdot n_2 + T_{B3} \cdot n_3 + T_{B4} \cdot n_4}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} =$$

$$= \frac{65 \cdot 1 + 75 \cdot 3 + 70 \cdot 2 + 0 \cdot 0}{1+3+2+0} = 71{,}66 \text{ ч.}$$

$$K_{Г(сист)} = \frac{1}{1 + \dfrac{T_{B(сист)}}{T_{0(сист)}}} = \frac{1}{1 + \dfrac{71{,}66}{31}} = 0{,}3019.$$

5.4. Структурное резервирование горношахтного оборудования

Из формул (5.2) – (5.7) следует, что с увеличением числа последовательно взаимодействующих элементов, являющегося следствием роста сложности различных объектов горношахтного оборудования, безотказность объектов при прочих неизменных условиях снижается.

Одним из основных средств обеспечения отказоустойчивости объектов в целом, т.е. сохранения их работоспособности при возникновении отказа одного или нескольких элементов, является резервирование.

В практике горного машиностроения постоянно пользуется нагрузочное резервирование, связанное с обеспечением способности элементов выдерживать действующие на них нагрузки (обеспечивать запас мощности двигателей, усилий, развиваемых механизмами подачи и различного рода домкратами, запас прочности элементов, установку предохранительных клапанов, муфт предельного момента и др.).

Установка промежуточных бункеров-накопителей в транспортных системах горных предприятий позволяет допускать простои определенной длительности в связи с отказами отдельных элементов транспортной системы, т.е. осуществлять временное резервирование.

В последние годы в практике создания различных средств механизации горных работ получает распространение структурное резервирование – резервирование с применением резервных элементов структуры объекта.

Резерв может быть нагруженным, если резервные элементы находятся в режиме основного элемента, и ненагруженным, если резервные элементы находятся в ненагруженном состоянии до начала выполнения или функций основного элемента.

Резервирование, осуществляемое без перестройки структуры объекта при возникновении отказа его элемента, называется постоянным.

Динамическое резервирование (резервирование, связанное с перестройкой структуры объекта), при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента, называется *резервированием – замещением*.

Если объект состоит из N параллельно взаимодействующих элементов одинакового функционального назначения и его работоспособность будет обеспечена при сохранении работоспособности хотя бы одного элемента, то считается, что $N-1$ элементов являются резервными (рис. 5.4).

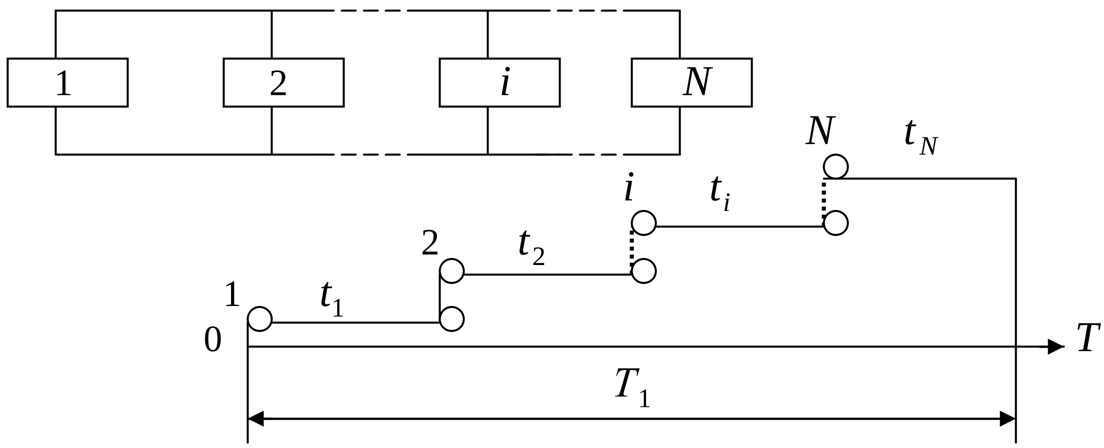


Рис. 5.4. Схема формирования потока отказов
при параллельном резервировании

При постоянном резервировании и нагруженном резерве вероятность отказа объекта, состоящего из N параллельно взаимодействующих элементов, согласно теореме умножения вероятностей для независимых событий составит

$$q(t) = \prod_{i=1}^{N} q_i(t), \tag{5.18}$$

где $q_i(t)$ - вероятность отказа i- го элемента.

Вероятность безотказной работы объекта находится как вероятность события, противоположного $q(t)$.

$$P(t)=1-\prod_{i=1}^{N} q_i(t)=1-\prod_{i=1}^{N}\left[1-P_i(t)\right]. \tag{5.19}$$

Для равнонадежных, параллельно взаимодействующих элементов формула имеет вид

$$P(t)=1-\left[1-P_i(t)\right]^N. \tag{5.20}$$

Среднее время работы объекта до отказа при известном аналитическом выражении функции $P(t)$ может быть рассчитано с учетом выражений по формуле

$$T_1=\int_0^{\infty} P(t)dt. \tag{5.21}$$

Если резервные элементы включаются в работу поочередно и не восстанавливаются до наступления отказа всей совокупности взаимодействующих элементов (резервирование замещением при ненагруженном резерве), то отказ объекта, имеющего один основной и $N-1$ резервных элементов, произойдет, когда откажут поочередно все элементы безразлично в какой последовательности (см. схему формирования потока отказов…). В этом случае

$$T_1=\sum_{i=1}^{N} T_{1i}. \tag{5.22}$$

При этом предполагается, что время введения резервного элемента на место отказавшего рабочего мало и им можно пренебречь, но всем временем введения резервного элемента, на место отказавшего пренебречь нельзя, то $T_1=T_{1i}$, и безотказность объекта не возрастает. В этом случае резервирование замещением при ненагруженном резерве может использоваться для снижения затрат времени на ликвидацию отказов объекта. При этом доход, получаемый за счет снижения величины времени восстановления работоспособности объекта, должен превышать затраты на приобретение и содержание резервных элементов.

Отношение числа резервных элементов объекта к числу резервируемых или основных элементов объекта, выраженное несокращенной дробью, называется кратностью резерва.

Если при общем числе элементов N объекта число основных элементов равно r, то кратность резерва

$$h = (N - r) / r, \tag{5.23}$$

где $N - r$ - число резервных элементов.

Резервирование с кратностью резерва один к одному называется дублированием.

При кратности резервирования $n < 1$ имеет место резервирование с дробной кратностью.

Последние способы резервирования обеспечивают меньший рост объекта, чем при $n > 1$, но являются более экономичными.

На горных предприятиях дублируются вентиляторные и водоотливные установки, некоторые элементы насосных станций механизированных крепей, систем электроснабжения и автоматизации горных машин. В многостоечных системах (костровых секциях механизированных крепей Донбасс) М-103 имеет резервирование с дробной кратностью гидростоек. В скребковых конвейерах приводные блоки могут резервироваться с кратностью $n \leq 1$. С такой же кратностью резервируется обычно и рабочий инструмент исполнительных органов очистных и проходческих машин.

Резервирование, при котором резервируется объект в целом, называется общим (рис. 5.5).

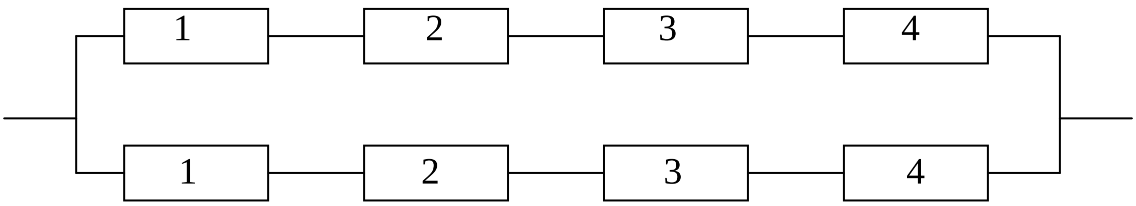


Рис. 5.5. Общее резервирование

При раздельном резервировании резервируются отдельные элементы (рис. 5.6) или их группы (рис. 5.7)

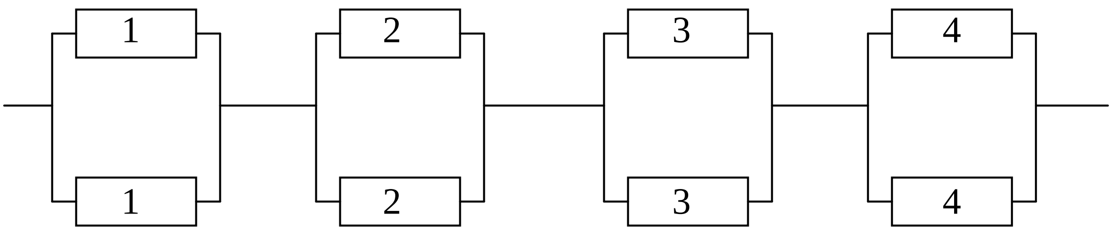


Рис. 5.6. Резервирование отдельных элементов

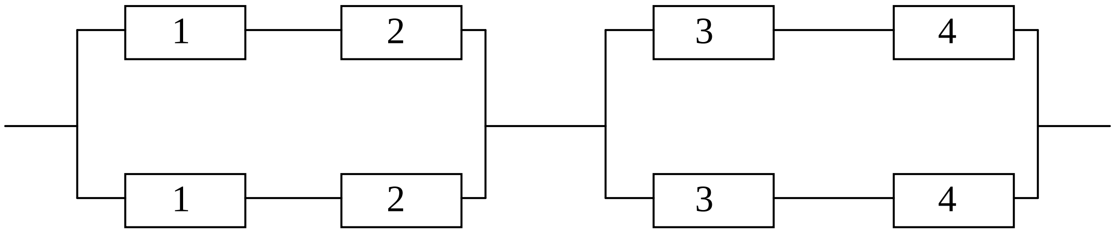


Рис. 5.7. Смешанное резервирование

Наибольшая эффективность в повышении безотказности объекта, как при постоянном, так и при скользящем резервировании достигается при раздельном поэлементном резервировании.

От параллельного (резервированного взаимодействия элементов в системах) следует отличать случай параллельной работы, например, двух водоотливных установок или конвейеров, когда их число принимается из условия обеспечения необходимой производительности водоотлива или транспортирования. В этом случае отказ одного из параллельно работающих элементов вызывает параметрический отказ всей системы и поэтому такое взаимодействие называется последовательным.

Взаимодействие элементов в системе может быть также смешанным. В этом случае вероятность безотказной работы системы при постоянном резервировании и нагруженном резерве отдельных объектов рассчитывается. Пример расчета для рис. 5.8. приведен ниже.

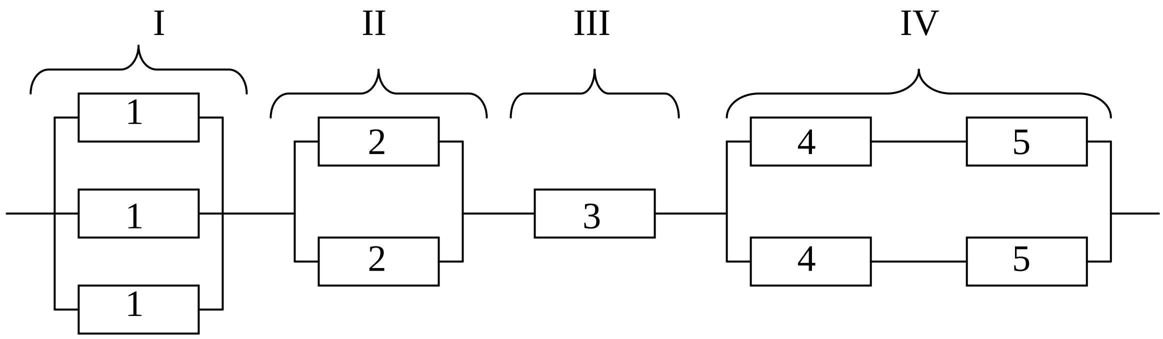


Рис. 5.8. Расчет резервирования

$$P(t) = P_I(t) \cdot P_{II}(t) \cdot P_{III}(t) \cdot P_{IV}(t),$$

где $P_I(t) = 1 - [q_1(t)]^3$; $P_{II}(t) = 1 - [q_2(t)]^2$;

или $P_I(t) = 1 - [1 - p_1(t)]^3$; $P_{II}(t) = 1 - [1 - p_2(t)]^2$.

$$P_{III}(t) = p_3(t); \qquad P_{IV}(t) = P_{*IV}(t) = p_4(t) \cdot p_5(t);$$

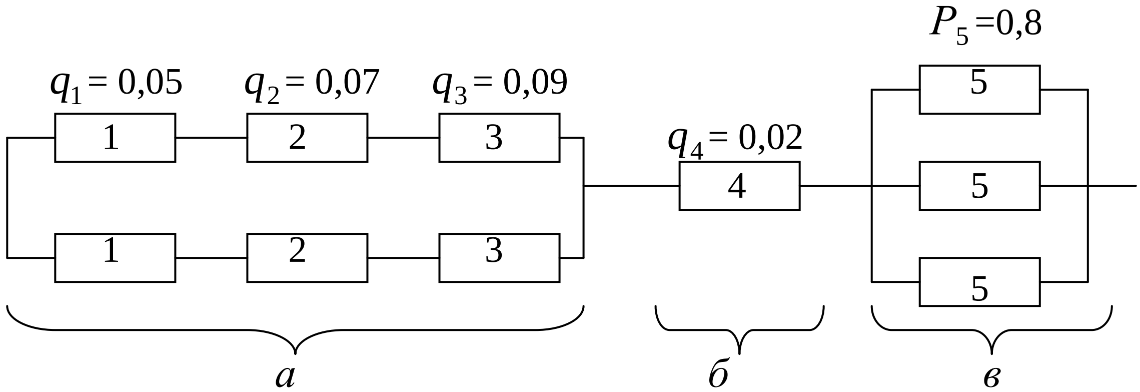
или $P_{IV}(t) = 1 - [1 - p_{*IV}(t)]^2 = 1 - [1 - p_4(t) \cdot p_5(t)]^2$.

Тогда для системы в целом

$$P_{IV}(t) = \{1 - [1 - p_1(t)]^3\}\{1 - [1 - p_2(t)]^2\} \cdot p_3(t) \cdot \{1 - [1 - p_4(t) \cdot p_5(t)]^2\},$$

т.е. для объектов I и II использовано раздельное, а для объекта IV – общее резервирование.

Пример 1. Требуется рассчитать вероятность отказа системы $q_{сист}$, имеющей следующую структурную схему взаимодействия элементов.



Схеме состоит из трех последовательно взаимодействующих подсистем: $а$, $б$ и $в$.

Поэтому $P_{сист} = P_а \cdot P_б \cdot P_в$.

Подсистема «$а$» имеет общее постоянное резервирование. Резерв нагруженный. Число параллельных ветвей N = 2, число основных ветвей r = 1.

Кратность резервирования составляет

$$h = \frac{N - r}{r} = \frac{2 - 1}{1} = 1/1 \qquad \text{(один к одному).}$$

$$P_{ветви} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = (1 - q_1) \cdot (1 - q_2) \cdot (1 - q_3).$$

Для подсистемы «$а$»

$$q_а = (1 - P_{ветви})^2 = [1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)]^2,$$

$$P_а = 1 - q_а = 1 - [1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)]^2.$$

Подсистема «$б$» состоит из одного элемента, поэтому для нее

$$P_б = 1 - q_4.$$

Подсистема «$в$» состоит из трех параллельно взаимодействующих элементов ($N = 3,\ r = 1$). Кратность резервирования для нее составляет

$$h = \frac{3-1}{1} = \frac{2}{1} \qquad \text{(два к одному)},$$

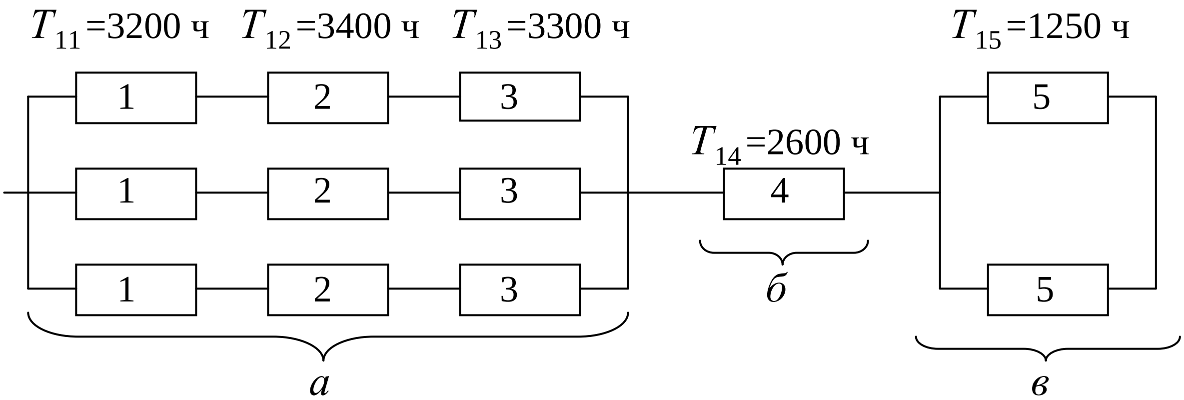
$$P_в = 1 - q_6 = 1 - q_5 = 1 - (1 - P_5)^3.$$

Окончательно можно записать

$$q_{сист} = 1 - P_{сист} =$$
$$= 1 - \left\{1 - \left[1 - (1-q_1)(1-q_2)(1-q_3)\right]^2\right\}(1-q_4)\left[1-(1-P_5)^3\right] =$$
$$= 1 - \left\{1 - \left[1 - (1-q_1)(1-q_2)(1-q_3)\right]^2\right\}(1-q_4)\left[1-(1-P_5)^5\right] =$$

$= 1·0,962·0,98·0,992= 0,065.$

Пример 2. Требуется определить среднюю наработку до отказа системы $T_{1(сист)}$, имеющей следующую структурную схему взаимодействия элементов. Показатели надежности элементов приведены на схеме.



Система состоит из трех последовательно взаимодействующих подсистем: $а, б, в$.

Поэтому $$T_{1(сист)} = \left[\frac{1}{T_{1(а)}} + \frac{1}{T_{1(б)}} + \frac{1}{T_{1(в)}}\right]^{-1}.$$

Подсистема «$а$» имеет общее постоянное резервирование. Резерв нагруженный, $N = 3,\ r = 1$.

Согласно формуле

$$T_{1(а)} = T_{1(ветви)} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{i+1}.$$

В свою очередь, каждая ветвь состоит из трех последовательно взаимодействующих элементов: 1, 2, 3.

Поэтому

$$T_{1(ветви)} = \left[\frac{1}{T_{1(1)}} + \frac{1}{T_{1(2)}} + \frac{1}{T_{1(3)}} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{3200} + \frac{1}{3400} + \frac{1}{3300} \right] = 1099 \text{ ч.}$$

Для $N = 3$, $r = 1 - i = 0, 1, 2$. Тогда

$$T_{1(a)} = 1099 \cdot \left(\frac{1}{0+1} + \frac{1}{1+1} + \frac{1}{2+1} \right) = 1099 \cdot 1{,}83 = 2011.$$

Подсистема «$б$» состоит из одного элемента, поэтому

$$T_{1(б)} = T_{14} = 2600 \text{ ч.}$$

Подсистема «$в$» имеет один основной $(r = 1)$ и один резервный элемент (общее число параллельно взаимодействующих элементов $N = 2$). Резервирование в случае отказа основного элемента «5» осуществляется замещением его аналогичным ранее не нагруженным элементом.

Средняя наработка до отказа подсистемы «$в$» составит

$$T_{1(в)} = 2T_{1(5)} = 2 \cdot 1250 = 2500 \text{ ч.}$$

Средние наработки до отказа отдельных подсистем установлены. Тогда для системы в целом

$$T_{1(сист)} = \left[\frac{1}{T_{1(a)}} + \frac{1}{T_{1(б)}} + \frac{1}{T_{1(в)}} \right]^{-1} = \left[\frac{1}{2011} + \frac{1}{2600} + \frac{1}{2500} \right]^{-1} = 780 \text{ ч.}$$

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ГОРНЫХ РАБОТ

7.1. Технологические мероприятия по поддержанию надежности горных машин

Выбранный на стадии проектирования и обеспеченный при изготовлении техники уровень её надёжности должен систематически поддерживаться при эксплуатации на горных предприятиях.

Для поддержания необходимого уровня постоянной готовности техники к использованию по назначению по фактору надёжности должен выполняться комплекс требований и мероприятий, главными из которых являются соблюдение инструкций по эксплуатации и организации рациональной системы, технического обслуживания и ремонта горношахтного оборудования.

Основным результатом соблюдения инструкций по эксплуатации должно быть отсутствие неправильных действий операторов, которые могут привести к возникновению отказов, называемых «ошибочными», а также выбор и соблюдение режимов работы горных машин, исключающих возможность появления значительных по величине или длительных по времени перегрузок элементов машин.

Техническое и ремонтное обслуживание горных машин представляет собой систему мероприятий по техническому уходу, поддержанию и восстановлению работоспособности горных машин.

Правильно организованные техническое обслуживание и ремонт горно-шахтного оборудования позволяют: повысить надёжность работы различных по функциональному назначению горных машин и предупредить быстрый износ элементов; своевременно подготовиться к ремонтным работам и качественно провести их в установленный срок; обеспечить производительную и безопасную работу техники; уменьшить эксплутационные расходы за счёт снижения числа аварийных отказов и убытков из-за их возникновение.

В положении о ППР установлены виды, регламенты и принципы организации технического обслуживания и плановых ремонтов; номенклатура основной нормативно-технической документации для планирования ремонтных нормативов; принципы организации смазочно-эмульсионного хозяйства; принципы организации учёта и движения оборудования; методы учёта и контроля за соблюдением действующих правил и норм по техническому обслуживанию, ремонту и эксплуатации оборудования.

Сущность ППР состоит в планируемом выполнении в соответствии со структурой ремонтного цикла установленных видов ТО и плановых ремонтов, объемы которых определяются фактическим техническим состоянием сборочных единиц и оборудования в целом.

Для очистного оборудования и оборудования для подготовительных работ положением о ППР предусматриваются следующие виды технического обслуживания: ежесменное (ТО-1), ежесуточное (ТО-2), и еженедельное (ТО-3).

ТО-1 выполняется дежурными электрослесарями, машинистами оборудования и рабочими производственных процессов; ТО-2 – ремонтными электрослесарями, постоянно обслуживающими данный вид оборудования; ТО-3 – теми же силами и электрослесарями электромеханической службы шахты. В двух последних случаях привлекаются машинисты оборудования и рабочие производственных процессов.

К плановым текущим ремонтам относятся: ежемесячное ремонтное обслуживание (РО), выполняемое ремонтными электрослесарями энергомеханической службы шахты, машинистами оборудования, рабочими производственных процессов, специализированными бригадами ремонтных электрослесарей; первый и второй текущие ремонты $Т_1$,$Т_2$ с периодичностью 3 и 6 месяцев соответственно выполняются теми же силами, что и РО, а также специализированными ремонтными наладочными, монтажными предприятиями производственных объединений и местных подразделений технического обслуживания заводов изготовителей техники.

Ремонты $Т_1$ и $Т_2$ являются основными видами текущих ремонтов. Если в горных машинах имеются элементы со сроками службы, превышающими 6 мес., но меньшими периодичности капитального ремонта, завод-изготовитель техники может назначить дополнительные виды текущих ремонтов ($Т_3$, $Т_4$, …) с периодичностью, равной 9, 12, … мес. Выполнение дополнительных видов текущих ремонтов осуществляются теми же силами, что и основных видов ремонтов. Для сложного оборудования (очистные и проходческие комплексы и агрегаты, подъемные и компрессорные установки главного проветривания) назначаются плановые текущие ремонты, совмещенные с проведением ревизий, наладок и регулировок составных частей и сборочных единиц оборудования; квартальные (НРК), полугодовые (НРП), годовые (НРГ) и двухгодичные (НРД). Плановые текущие ремонты должны проводиться силами специализированных наладочных и монтажных управлений.

Плановый капитальный ремонт (к) выполняется специализированными ремонтными предприятиями с периодичностью, установленной нормативно-технической документацией.

Продолжительность всех видов планового технического обслуживания и ремонта устанавливается отраслевыми ремонтными нормативами. Объемы технического обслуживания и ремонта для конкретных условий эксплуатации систем очистного и проходческого оборудования разрабатываются энергомеханической службой объединений и шахт на основании инструкций по ТО, руководства по наладке оборудования и др. нормативных документов, в которых приводится состав необходимых работ и технология их выполнения.

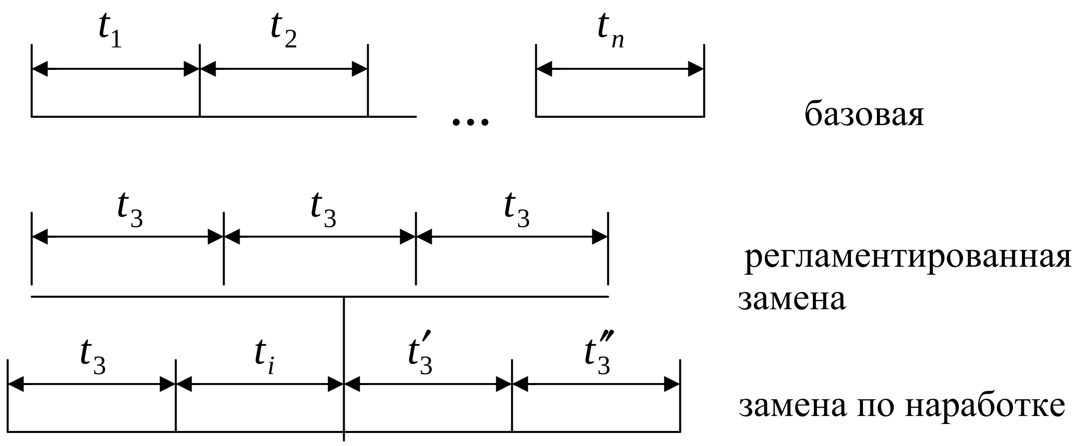


Рис. 7.1. Графики ремонта оборудования

Заводские инструкции при назначении периодичности технического обслуживания и ремонтов оперируют средними данными о стойкости узлов и деталей и не могут учесть условий и режимов эксплуатации горной техники в каждом конкретном случае. Поэтому на практике еще пока достаточно широко распространена «базовая» замена элементов, т.е. замена элементов после их отказов. Новый элемент, заменивший отказавший, опять работает до тех пор, пока не откажет.

Если первый элемент имел наработку до отказа t_1, второй – t_2, а последний – t_n, то суммарная $\sum t_p = \sum_{i=1}^{n} t_i$.

Суммарные затраты на внеплановые ремонты

$$c(t_p) = nc_o, \tag{7.1}$$

где - число отказов за наработку t_p, c_o - средняя стоимость замены элемента после отказа, включая убытки из-за простоев оборудования, р.

Удельные затраты $c_{уд.о}$ на внеплановые ремонты

$$c_{уд.о} = nc_o/t_p = nc_o / \sum_{i=1}^{n} t_i = c_o T_1, \tag{7.2}$$

где T_1 - средняя наработка элемента до отказа, ч.

Базовая замена элементов может быть оправдана только лишь при отказах внезапного типа и большой величине депрессии наработок элементов до отказа.

Регламентированная замена состоит в обязательной замене всех элементов данного типа через интервалы времени, которые недавно были поставлены взамен отказавших. Данный способ удобен для осуществления замен элементов, отказы которых носят постепенный характер, а также когда обслуживающему персоналу затруднительно вести учет наработок до отказа каждого элемента из многих элементов, имеющихся в оборудовании (гидростойки, гидрораспределители и др. элементы). Основная задача заключается в нахождении такого периода групповой замены однотипных элементов, для которого убытки из-за необходимости ликвидации аварийных отказов элементов с фактическими ресурсами или сроком службы $t_{cp} < t_3$, а также из-за недоиспользования ресурса элементов, для которых $t_{cp} > t_3$, будут минимальными.

Суммарные затраты на возможные замены элементов после возникновения отказов и на регламентированные замены при наработке, равной t_3, определяются из выражения

$$c(t_3) = m(t_3)c_o N + c_p N, \tag{7.3}$$

где c_o, c_p - средние стоимости соответственно внеплановой и регламентированной замен одного элемента; $m(t_3)$ - математическое ожидание числа отказов элемента, установленного на одном и том же месте (функция восстановления); N - число однотипных элементов.

Удельные затраты на единицу наработки

$$c_{уд} = \frac{m(t_3)}{t_3} c_o N + \frac{c_p}{t_3} N. \tag{7.4}$$

Чтобы найти по этой формуле интервал замены по наработке или времени, необходимо установить значение стоимостных параметров c_p и c_o, и величину математического ожидания числа отказов $m(t_3)$ в течение различных возможных интервалов t_3, принимают то значение t_3, при котором $c_{уд} = \min$.

Оптимальная величина t_3 должна быть меньше средней наработки элемента до отказа. В этом случае для инженерных расчетов можно принять, что математическое ожидание числа отказов $m(t_3)$ за период (0; t_3) численно равна вероятности отказа элемента $q(t_3)$ за этот же период.

Затраты при плановой (регламентированной) замене элемента

$$c_p = \frac{s_{н.э} + n_в s_в}{n_в + 1} + c_{зам.р} + c_{тр.р} + c_{н.р}, \tag{7.5}$$

где $s_{н.э}$ - стоимость нового элемента; $n_{\text{в}}$ - среднее число возможных восстановлений элемента при проведении регламентированных замен с периодом t_3; $s_{\text{в}}$ - средняя стоимость восстановления элементов; $c_{зам.р}$ - средняя стоимость работ по замене элемента по плану, включая стоимость доставки в пределах шахты; $c_{\text{тр.р}}$ - средняя стоимость транспортных расходов по доставке на рудоремонтный завод и обратно; $c_{н.р}$ - величина убытков от недоиспользования основных фондов за время регламентированной замены, транспортирования, ремонта элемента и прочие расходы.

При замене элемента после отказа затраты (руб.) составляют

$$c_o = \frac{(1+\kappa_{\text{бр}})s_{\text{н.э}} + \kappa_{\text{в.п.и}} s_{\text{в}}}{2} + c_{\text{зам.о}} + c_{\text{тр.о}} + c_{\text{н.о}} + c_{см.э} + c_{\text{уб}}, \qquad (7.6)$$

где $\kappa_{\text{бр}}$ - коэффициент замены бракованных элементов новыми; $\kappa_{\text{в.п.и}}$ - коэффициент восстановления и повторного использования элементов; $c_{\text{зам.о}}$ - средняя стоимость работ по замене элемента после его отказа, включая стоимость транспортных расходов при отказе элемента; $c_{н.о}$ - убытки от недоиспользования основных фондов в период замены, транспортирования и восстановления элемента после отказа; $c_{см.э}$ - стоимость возможных поломок смежных элементов из-за отказа рассматриваемого объекта; $c_{уб}$ - стоимость убытков из-за простоя участка во время ликвидации отказа.

Индивидуальная замена заключается в том, что элемент не может меняться, если его наработка меньше t_3, и он является исправным. Но в то же время, если произошел отказ элемента при наработке $t_i < t_3$, то новый период плановой замены t_3 назначается после ликвидации отказа. При данном способе замены необходимо вести учет «возраста» каждого элемента.

Индивидуальная замена предпочтительна при замене дорогостоящих элементов машин.

При агрегатном способе ремонта отдельные составные части или сборочные единицы оборудования, содержащие изношенные детали, заменяются новыми или заранее отремонтированными. Составные части и сборочные единицы, содержащие изношенные детали, заменяются новыми или заранее отремонтированными. Демонтированные составные части и сборочные единицы, содержащие изношенные детали, подлежат восстановлению, осуществляемому, как правило, силами ремонтных предприятий. Этот способ обеспечивает высокое качество ремонта.

Затраты при индивидуальной замене

$$c = q(t_3)c_o + p(t_3)c_p, \qquad (7.7)$$

где c_o, c_p - средние стоимости соответственно внеплановой (при отказе) и плановой замены элемента; $q(t_3)$, $p(t_3)$ - соответственно вероятность отказа и безотказной работы элемента.

Удельные затраты

$$c_{уд} = \frac{q(t_3)c_o + p(t_3)c_p}{t_{ср}}, \qquad (7.8)$$

где $t_{ср} = \int_0^{t_3} p(t)dt$ - среднее значение наработки элемента до выдачи в плановый ремонт.

7.2. Снижение затрат времени на ликвидацию

Ликвидация отказов различных конструктивных элементов средств механизации горных работ – процесс, который нельзя совместить с работой средств механизации – всегда вызывает необходимость проведения внеплановых (аварийных) ремонтов в периоды рабочих смен, а следовательно, приводит к сокращению времени, отводимого на выполнение средствами механизации своих основных функций.

Снижение затрат времени на ликвидацию отказов горных машин, комплексов и агрегатов тесным образом связано с возможностями правильной оценки технического состояния элементов машин и их сборочных единиц, а также с разработкой методов установления оптимальной периодичности текущих ремонтов оборудования.

Четкое проведение регламентированных работ по ежесменному, ежесуточному техническому обслуживанию позволяет предотвратить или существенно сократить число таких неполномочных отказов (перекосы секций крепи, потери резцов в исполнительных органах комбайнов, течи в гидросистемах крепи и комбайна, подгорание контактов электропусковой аппаратуры и др.).

Для правильного определения технического состояния машин требуется широкое внедрение на горных предприятиях средств технической диагностики и методов диагностирования.

Техническая диагностика в процессе эксплуатации горных машин позволяет на основе определения их технического состояния снизить простои машин за счет правильно установленных ресурсов элементов, сборочных единиц и своевременной их замены; обоснованно устанавливать виды и объем ремонтов; полнее использовать межремонтные ресурсы машин; сократить расход запасных частей; правильно планировать работу ремонтных служб; совершенствовать систему ППР.

Техническое состояние горных машин, их сборочных единиц и элементов характеризуется рядом параметров. К диагностическим параметрам относятся: мощность, температура, давление, величина шума и вибрации, сопротивление изоляции обмоток электродвигателей и другие факторы.

Для определения периода замены элемента, отказавшего в результате износа, можно воспользоваться функцией вероятности безотказной работы элемента для процесса изнашивания с сильным перемешиванием:

$$P(u) = 0{,}5 + \Phi(z)\left[\frac{\omega - \delta_o - m_\varsigma t}{\upsilon_v \sqrt{m_\varsigma(\omega - \delta_o)}}\right], \tag{7.9}$$

где $\Phi(z)$ - интеграл вероятностей Лапласа; δ_o - начальное значение измеряемого параметра; ω - критическое значение измеряемого параметра, при достижении которого элемент должен быть заменен; m_ς и υ_v - математическое ожидание и коэффициент вариации скорости процесса изнашивания.

Задаваясь величиной вероятности безотказной работы элемента $P_u(t)$, можно найти наработку элемента до замены по фактору наступления его предельного износа.

Допустим, требуется, чтобы $P_u(t) > 0{,}95$. Из формулы (7.9) получим

$$\Phi(z) = P_u(t) - 0{,}5 \cdot 0{,}95 - 0{,}5 = 0{,}45,$$

где z - величина, характеризуемая отношением в квадратных скобках в формуле (7.9).

Из табл. П1 найдем, что $\Phi(z) = 0{,}45$ при $z = 1{,}645$. Тогда при известных значениях ω, δ_o и m_ς получим

$$t_в = \frac{\omega - \delta_o - 1{,}645\upsilon\sqrt{m_\varsigma(\omega - \delta_o)}}{m_\varsigma}.$$

Коэффициент вариации скорости процесса изнашивания может приниматься $\upsilon_v = 0{,}2 \div 0{,}3$.

7.3. Расчет необходимого количества запасных частей

Средства механизации горных работ относятся к системам многократного действия, которые должны выполнять заданные функции в течении длительного времени или наработки t (например, в межремонтный период). За это время в системе может произойти случайное число n, обусловленное ненадежностью отдельных ее элементов.

Поток возникающих отказов можно считать простейшим, что правомерно для горных машин и их систем, среднее число отказов совокупности N однотипных элементов определяется как

$$n_{ср} = Nt / T_1, \tag{7.10}$$

где t - рассматриваемый период эксплуатации; T_1- наработка до отказа рассматриваемого типа элементов.

Отказавший элемент обычно не восстанавливается, а заменяется новым, изымается из запаса. Поэтому число израсходованных элементов z за время или наработку t будет равно числу отказов, возникающих за это же время или наработку (без учета вторичных отказов). При этих условиях вероятность $P_z(t)$- того, что за время наработку t потребуется точно z запасных элементов для ликвидации отказов, может быть определена по формуле Пуассона

$$P_z(t) = \frac{(Nt)^z}{T_1^{\,z} z!} e^{-\frac{Nt}{T_1}}, \tag{7.11}$$

где $z = 0, 1, 2, \ldots, i, \ldots, \infty$.

Среднее количество запасных элементов $z_{ср}$, расходуемых за межремонтный период $t_{мр}$, равно среднему числу отказов $n_{ср}$ элементов, т.е. согласно выражению (7.10)

$$z_{ср} = Nt_{мр} / T_1. \tag{7.12}$$

В силу случайности возникновения отказов может потребоваться большее или меньшее число запасных элементов, чем $z_{ср}$. При запасе элементов $N_з$, равному среднему ожидаемому их расходу $z_{ср}$, т.е. если коэффициент запаса $К_з = N_з / z_{ср} = 1$, потребность в запасных элементах будет удовлетворяться с гарантированной вероятностью 0,5, которая явно не достаточна. Поэтому необходимо производить расчет числа запасных элементов с заданной гарантированной вероятностью $P_в$ их наличия.

Вероятностью того, что за межремонтную наработку $t_{мр}$ потребуется не более чем $N_з$ запасных элементов, может быть найдена из выражения

$$P_{N_3}(t_{мр}) = e^{-\frac{Nt_{мр}}{T_1}} \sum_{z=0}^{N_3} \frac{(Nt_{мр})^z}{T_1^{\,z} z!}. \tag{7.13}$$

Вероятность $P_{N_3}(t_{мр})$ должна быть не менее принятой гарантированной вероятности $P_в$ обеспечения запасными частями, т.е. $P_{N_3}(t_{мр}) \geq P_в$. С учетом сказанного в выражении (7.12) формула для расчета гарантированной вероятности наличия запасных элементов примет вид

$$P_{N_3}(t_{мр}) = e^{-z_{ср}} \sum_{z=0}^{N_3} \frac{z_{ср}^z}{z!} = P_в. \qquad (7.14)$$

Пользуясь графиком зависимости гарантированной вероятности $P_в$ от параметров $z_{ср}$, можно найти $N_з$ (рис. 7.2).

Таким образом, для обеспечения высокой вероятности ликвидации отказа горной машины по фактору наличия запасных элементов в запасе необходимо иметь не $z_{ср}$, а $N_з$ элементов, т.е.

$$N_з = к_з z_{ср}. \qquad (7.15)$$

При этом коэффициент запаса $к_з = N_з / z_{ср} > 1$.

Зависимость коэффициента $к_з$ от $z_{ср}$ и $P_в$ приведена в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Значение коэффициента запаса

$z_{ср}$	1	2	3	4	5	6	7
$P_в$	0,9…1,8	1,65	1,57	1,50	1,47	1,40	1,37
$P_в$	0,95…2,3	2,6	1,83	1,75	1,67	1,63	1,6

Очевидно, что с увеличением среднеожидаемого числа отказов, т.е. при обеспечении запаса на большее число элементов или на более длительный срок их эксплуатации, коэффициент запаса уменьшается (рис. 7.3). Следовательно, экономически выгоднее приобретать запасные элементы на все эксплуатирующиеся в производственном объединении комплексы.

Суммарное эксплуатационное число запасных элементов

$$N_{з.э} = N_з + N_{р.з} + N_{хр} + N_{пр},$$

где $N_з$ - число запасных элементов для ликвидации отказов, определенное по формуле 7.15; $N_{р.з}$ - необходимое число запасных элементов для регламентированных замен; $N_{хр}$ - расход элементов при хранении; $N_{пр}$ - расход элементов из-за прочих причин.

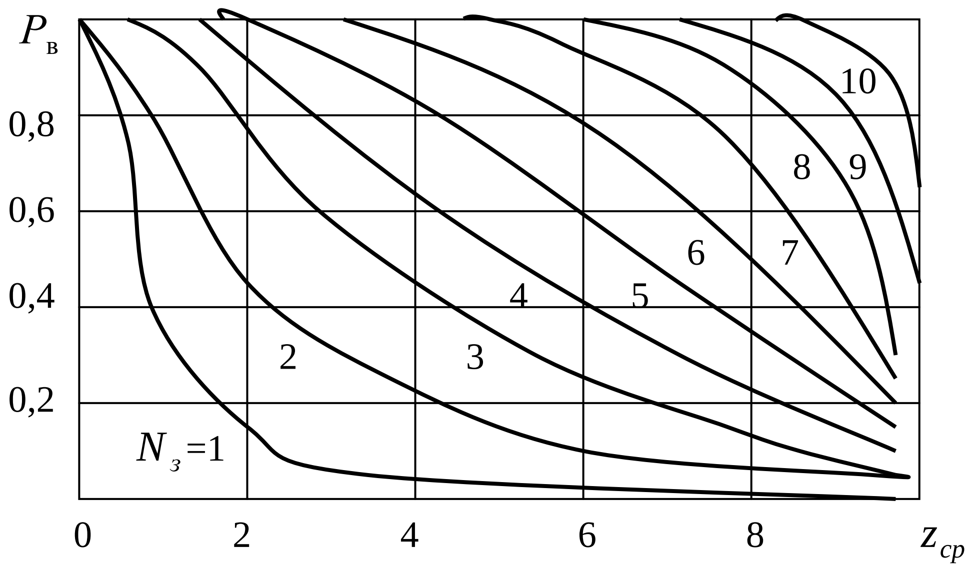


Рис. 7.2. График зависимости гарантированной вероятности обеспечения запаса элементов от параметра $z_{ср}$ при различных значениях $N_з$

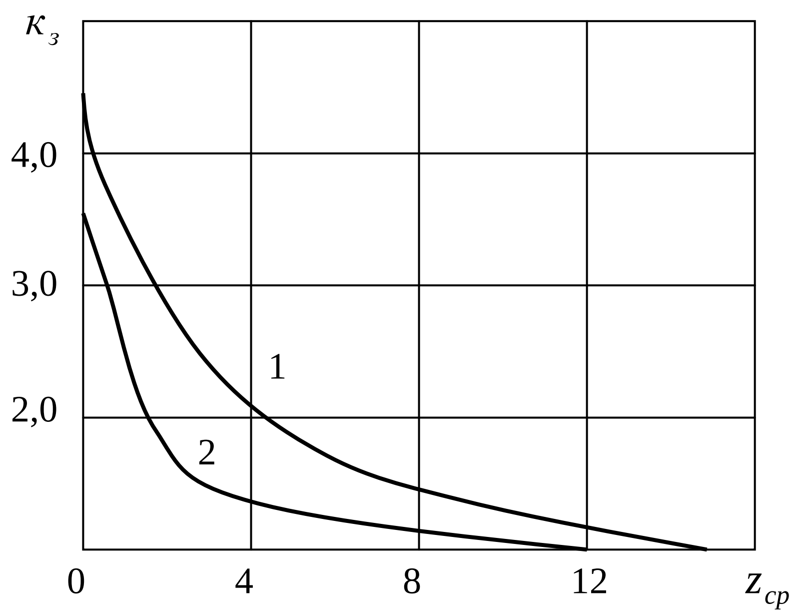


Рис. 7.3. График зависимости коэффициента запаса элементов от среднего числа их отказов $z_{ср}$ за межремонтный период при вероятности обеспечения запаса $P_в$ = 0,95 (кривая 1) и $P_в$ = 0,9 (кривая 2)

Пример. Требуется рассчитать необходимое количество запчастей $N_з$, обеспечивающих потребность в них с гарантированной вероятностью $P_в$ = 0,8 для следующих условий: $t_{мр}$ = 1000 ч, T_1 = 1100 ч, N = 6.

По формуле $z_{cp} = \frac{t_{мр} N}{T_1} = \frac{1000 \cdot 6}{1100} = 4$,

а согласно выражению $\sum_{z=0}^{N_3} \frac{z_{cp}^{z}}{z!} = \sum_{z=0}^{N_3} \frac{4^z}{z!} = \frac{0,8}{e^{-4}} = \frac{0,8}{0,0183} = 43,68.$

Первое слагаемое суммы при $z = 0$ будет равно $\frac{4^0}{0!} = \frac{1}{1} = 1;$

второе слагаемое при $z = 1$ $\frac{4^1}{1} = 4;$

третье слагаемое при $z = 2$ $\frac{4^2}{1 \cdot 2} = 8;$

четвертое слагаемое при $z = 3$ $\frac{4^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 10,67;$

пятое слагаемое при $z = 4$ $\frac{4^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 10,67;$

шестое слагаемое при $z = 5$ $\frac{4^5}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5} = 8,53;$

седьмое слагаемое при $z = 6$ $\frac{4^6}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} = 5,69.$

Таким образом, при шести слагаемых (z: 0, 1, …, 5)

$$\sum_{z=0}^{N_3=5} \frac{4^z}{z!} = 42,87, \text{ что} < 43,68 \text{ (разница } 0,81);$$

при семи слагаемых (z: 0, 1, …, 6)

$$\sum_{z=0}^{N_3=6} \frac{4^z}{z!} = 48,56, \text{ что} > 43,68 \text{ (разница } 4,88).$$

По степени приближения к величине P

$$P_{B=0,8} / e^{-z_{cp}} = 43,68$$

можно принять $N_3 = z = 5$, т.е. 5 запасных элементов на 6 однотипных элементов.

Фактическая величина $P_в$ при этом составит

$$P_в = e^{-4} \sum_{z=0}^{N_3=5} \frac{4^z}{z!} = 42,87 \cdot e^{-4} = 42,87 \cdot 0,0183 = 0,785,$$

т.е. несколько меньше $P_в = 0,8$.

Если же принять $N_3 = z = 6$, то

$$P_в = e^{-4} \sum_{z=0}^{N_3=6} \frac{4^z}{z!} = 48{,}56 \cdot e^{-4} = 48{,}56 \cdot 0{,}0183 = 0{,}888,$$

т.е. существенно больше $P_в = 0{,}8$.

Таким образом, окончательно принимаем

$$N_3 = 5 \quad \text{и} \quad \kappa_3 = \frac{N_3}{z_{cp}} = \frac{5}{4} = 1{,}25.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Значение функции $\Phi(z)$

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0,00	0,0	0,34	0,1331	0,68	0,2517	1,02	0,3461
0,01	0,0040	0,35	0,1368	0,69	0,2549	1,03	0,3485
0,02	0,0080	0,36	0,1406	0,70	0,2580	1,04	0,3508
0,03	0,0120	0,37	0,1443	0,71	0,2611	1,05	0,3531
0,04	0,0150	0,38	0,1480	0,72	0,2642	1,06	0,3554
0,05	0,0192	0,39	0,1517	0,73	0,2673	1,07	0,3577
0,06	0,0239	0,40	0,1554	0,74	0,2703	1,08	0,3599
0,07	0,0279	0,41	0,1591	0,75	0,2734	1,09	0,3621
0,08	0,0319	0,42	0,1628	0,76	0,2764	1,10	0,3643
0,09	0,0359	0,43	0,1664	0,77	0,2794	1,11	0,3665
0,10	0,0398	0,44	0,1700	0,78	0,2823	1,12	0,3686
0,11	0,0438	0,45	0,1736	0,79	0,2852	1,13	0,3708
0,12	0,0478	0,46	0,1772	0,80	0,2881	1,14	0,3729
0,13	0,0517	0,47	0,1808	0,81	0,2910	1,15	0,3749
0,14	0,0557	0,48	0,1844	0,82	0,2939	1,16	0,3770
0,15	0,0596	0,49	0,1879	0,83	0,2967	1,17	0,3790
0,16	0,0636	0,50	0,1915	0,84	0,2995	1,18	0,3810
0,17	0,0675	0,51	0,1950	0,85	0,3023	1,19	0,3830
0,18	0,0714	0,52	0,1985	0,86	0,3051	1,20	0,3849
0,19	0,0753	0,53	0,2019	0,87	0,3078	1,21	0,3869
0,20	0,0793	0,54	0,2054	0,88	0,3106	1,22	0,3883
0,21	0,0832	0,55	0,2088	0,89	0,3133	1,23	0,3907
0,22	0,0871	0,56	0,2123	0,90	0,3159	1,24	0,3925
0,23	0,0910	0,57	0,2157	0,91	0,3186	1,25	0,3944
0,24	0,0948	0,58	0,2190	0,92	0,3212	1,26	0,3962
0,25	0,0987	0,59	0,2224	0,93	0,3238	1,27	0,3980
0,26	0,1026	0,60	0,2257	0,94	0,3264	1,28	0,3994
0,27	0,1064	0,61	0,2291	0,95	0,3289	1,29	0,4015
0,28	0,1103	0,62	0,2324	0,96	0,3315	1,30	0,4032
0,29	0,1141	0,63	0,2367	0,97	0,3340	1,31	0,4049
0,30	0,1179	0,64	0,2389	0,98	0,3365	1,32	0,4066
0,31	0,1217	0,65	0,2422	0,99	0,3389	1,33	0,4082
0,32	0,1255	0,66	0,2454	1,00	0,3413	1,34	0,4099
0,33	0,1293	0,67	0,2486	0,01	0,3438	1,35	0,4115

Окончание табл. П1

z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)	z	Φ(z)
1,36	0,4131	1,69	0,4545	2,04	0,4793	2,70	0,4965
1,37	0,4147	1,70	0,4554	2,06	0,4803	2,72	0,4967
1,38	0,4162	1,71	0,4564	2,08	0,4812	2,74	0,4969
1,39	0,4177	1,72	0,4578	2,10	0,4821	2,76	0,4971
1,40	0,4192	1,73	0,4582	2,12	0,4830	2,78	0,4973
1,41	0,4207	1,74	0,4591	2,14	0,4838	2,80	0,4974
1,42	0,4222	1,75	0,4599	2,16	0,4846	2,82	0,4976
1,43	0,4236	1,76	0,4608	2,18	0,4854	2,84	0,4977
1,44	0,4251	1,77	0,4615	2,20	0,4861	2,86	0,4979
1,45	0,4265	1,78	0,4625	2,22	0,4868	2,88	0,4980
1,46	0,4279	1,79	0,4633	2,24	0,4875	2,90	0,4981
1,47	0,4292	1,80	0,4641	2,26	0,4881	2,92	0,4982
1,48	0,4306	1,81	0,4649	2,28	0,4887	2,94	0,4984
1,49	0,4319	1,82	0,4656	2,30	0,4893	2,96	0,4985
1,50	0,4332	1,83	0,4664	2,32	0,4898	2,98	0,4986
1,51	0,4345	1,84	0,4671	2,34	0,4904	3,00	0,4988
1,52	0,4357	1,85	0,4678	2,36	0,4909	3,10	0,4990
1,53	0,4370	1,86	0,4686	2,38	0,4913	3,20	0,49931
1,54	0,4382	1,87	0,4693	2,40	0,4918	3,30	0,4995
1,55	0,4394	1,88	0,4699	2,42	0,4922	3,40	0,49966
1,56	0,4406	1,89	0,4706	2,44	0,4927	3,50	0,4997
1,57	0,4418	1,90	0,4713	2,46	0,4931	3,60	0,49984
1,58	0,4429	1,91	0,4719	2,48	0,4934	3,70	0,49989
1,59	0,4441	1,92	0,4726	2,50	0,4938	3,80	0,49993
1,60	0,4452	1,93	0,4732	2,52	0,4941	3,90	0,49995
1,61	0,4463	1,94	0,4738	2,54	0,4945	4,00	0,499968
1,62	0,4474	1,95	0,4744	2,56	0,4948	4,10	0,499978
1,63	0,4484	1,96	0,4750	2,58	0,4951	4,20	0,499987
1,64	0,4495	1,97	0,4756	2,60	0,4953	4,30	0,499992
1,65	0,4505	1,98	0,4761	2,62	0,4956	4,40	0,499995
1,66	0,4515	1,99	0,4767	2,64	0,4959	4,50	0,499997
1,67	0,4525	2,00	0,4772	2,66	0,4961	4,60	0,499998
1,68	0,4535	2,02	0,4783	2,68	0,4963	5,00	0,499999

Таблица П2

Значения χ^2 в зависимости от r и P

r \ P	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
2	0,211	0,446	0,713	1,886	2,41	3,22	4,60	5,99
3	0,584	1,005	1,424	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82
4	1,064	1,649	2,20	3,86	4,88	5,99	7,78	9,49
5	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07
6	2,20	3,07	3,83	5,85	7,23	8,56	10,64	12,59
7	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07
8	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51
9	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92
10	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31
11	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68
12	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0

Таблица П3

Значения $n\omega_n^2(\alpha)$

α	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
$n\omega_n^2(\alpha)$	0,4614	0,3473	0,2412	0,1843	0,1467	0,1184

Таблица П4

Значения коэффициентов r_1 и r_2

n	r_1			r_2		
	$\gamma = 0,8$	$\gamma = 0,9$	$\gamma = 0,95$	$\gamma = 0,8$	$\gamma = 0,9$	$\gamma = 0,95$
5	1,62	2,05	2,54	0,63	0,54	0,40
6	1,54	1,90	2,21	0,66	0,57	0,51
7	1,48	1,80	2,13	0,68	0,59	0,53
8	1,43	1,82	2,01	0,70	0,62	0,55
9	1,40	1,66	1,91	0,72	0,63	0,57
10	1,37	1,61	1,83	0,73	0,65	0,59
11	1,35	1,57	1,78	0,74	0,66	0,60
12	1,33	1,53	1,73	0,75	0,67	0,62
13	1,31	1,50	1,69	0,76	0,68	0,63
14	1,29	1,48	1,65	0,77	0,69	0,64
15	1,20	1,46	1,62	0,78	0,70	0,65
20	1,24	1,37	1,51	0,81	0,74	0,69
25	1,21	1,33	1,44	0,83	0,76	0,72
30	1,18	1,29	1,39	0,84	0,78	0,74
40	1,16	1,24	1,32	0,87	0,81	0,77
50	1,14	1,21	1,28	0,88	0,83	0,79
60	1,12	1,19	1,25	0,89	0,84	0,81
80	1,10	1,16	1,21	0,90	0,86	0,83
100	1,09	1,14	1,19	0,91	0,88	0,85
150	1,07	1,12	1,15	0,93	0,90	0,87
200	1,06	1,10	1,13	0,94	0,91	0,89
250	1,06	1,09	1,11	0,95	0,92	0,90
300	1,05	1,08	1,10	0,95	0,93	0,91
400	1,04	1,07	1,09	0,96	0,94	0,92

Таблица П5

Значения коэффициента Стьюдента

	К= 4	К= 5	К= 6	К= 7	К= 8	К= 9	К= 10	К= 11
0,8 0,9 0,95	1,533 2,132 2,776	1,476 2,015 2,571	1,440 1,943 2,447	1,415 1,845 2,365	1,397 1,860 2,306	1,383 1,833 2,262	1,372 1,813 2,220	1,363 1,796 2,201
	К= 12	К= 13	К= 14	К= 15	К= 16	К= 17	К= 18	К= 19
0,8 0,9 0,95	1,356 1,782 2,179	1,350 1,771 2,160	1,345 1,761 2,145	1,341 1,753 2,131	1,337 1,746 2,120	1,333 1,740 2,110	1,330 1,734 2,101	1,328 1,729 2,093
	К= 20	К= 22	К= 24	К= 26	К= 28	К= 30	К= 40	К= 50
0,8 0,9 0,95	1,325 1,725 2,086	1,321 1,717 2,074	1,318 1,711 2,064	1,315 1,706 2,056	1,313 1,701 2,048	1,310 1,697 2,042	1,303 1,684 2,021	1,299 1,676 2,009
	К= 60	К= 90	К=100	К=150	К=200	К=300	К=500	
0,8 0,9 0,95	1,296 1,671 2,000	1,292 1,664 1,990	1,290 1,660 1,984	1,287 1,655 1,976	1,236 1,653 1,972	1,284 1,650 1,968	1,283 1,648 1,965	1,282 1,645 1,960

ЛИТЕРАТУРА

1. Гетопанов В.Н., Рачек В.М. Проектирование и надежность средств комплексной механизации. М.: Недра, 1986.

2. Певзнер Л.Д. Надежность горного электрооборудования и технических средств шахтной автоматики. М.: Недра, 1983.

3. Надежность аппаратуры и средств горной автоматики/ Л.Г. Мелькумов, М.С. Рабинович, В.Б. Гизенбург и др. М.: Недра, 1974.

4. Солод В.И., Гетопанов В.Н., Шпильберг И.Л. Надежность горных машин и комплексов. М.: МГИ, 1972.

5. Чавчанидзе В.В., Кумсишвили В.А. Об определении законов распределения на основе малого числа наблюдений// Труды совещания «Применение вычислительной техники при автоматизации производства». М.: Машгиз, 1961.

6. Березин О.П. Определение законов распределения малых выборок методом прямоугольных вкладов// Докл. к научно-технической конференции по надежности судового оборудования. М.: НТО Судпрома, 1965. Вып. 65.

Ольга Александровна Курбатова,
Людмила Степановна Ксендзенко,
Виктор Иванович Чеботкевич

Надежность горных машин

Учебное пособие

Техн. редактор Н.М. Белохонова
Корректор

Подписано в печать. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. Уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. Заказ.

Издательство ДВГТУ, 690950, Владивосток, Пушкинская, 10
Типография издательства ДВГТУ, 690950 Владивосток, Пушкинская, 10