

Цена 21 р.

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

В. В. СТРЕКОПЫЛОВ А. В. ИСАЕВ

НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВОВ

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
1999

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

В.В. СТРЕКОПИТОВ А.В. ИСАЕВ

Посвящается 190-летию
Петербургского государственного
университета путей сообщения

НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВОВ

Учебное пособие

Дорожову Сергею и команде
Хуи
на добрую работу!!!



СПИСК ПИТЕРБУРГ
1999

1402.2000

Стрекошников В.В., Исаев А.В.

Надежность локомотивов: Учебное пособие. – СПб: ПГУПС, 1999. – 54 с.

Библиогр.: 14 назв. Табл. 10. Ил. 7.

Содержит краткие сведения из теории надежности, основные понятия надежности, используемые в практике эксплуатации локомотивов, и примеры расчета надежности тяговых электрических машин.

Включены материалы, необходимые для освоения студентами и слушателями курсов повышения квалификации раздела "Надежность локомотивов".

Предназначено для студентов специальности "Локомотивы (тепловозы)".

Рецензент А.А.Веженинов ("Транском", Октябрьская железная дорога).

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Термины теории надежности

В данном разделе приводятся наиболее распространенные термины, без знания которых изучение настоящего пособия вызовет затруднения.

Все приводимые термины расположены в алфавитном порядке.

Безотказность – свойство изделия или системы сохранять работоспособность в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации. Этот термин в какой-то мере аналогичен определению надежности.

Восстанавливаемое устройство – устройство, параметры которого после отказа могут быть восстановлены в полном объеме. Для ряда локомотивного оборудования это понятие условно, например: тяговый электродвигатель после отказа восстанавливается, но это связано с отстранением тепловоза от работы и заменой данного двигателя другим. Таким образом, он выступает как восстанавливаемая и невосстанавливаемая система одновременно. В ряде случаев (например, для полупроводниковых приборов) таких сомнений не возникает.

Восстанавливаемость – свойство изделия приобретать после ремонта первоначальные параметры.

Дефект – любое нарушение исправности объекта.

Интенсивность восстановления – количество восстановлений (ремонтов) одноименного оборудования, произведенное в рассматриваемый промежуток времени.

Интенсивность отказов – количество отказов в единицу времени, отнесенное к числу элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени. Иногда в литературе, например, в [3], этому определению соответствует термин "опасность отказов".

Исправное состояние – состояние, при котором объект соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. В исправном состоянии объект не соответствует хотя бы одному из требований.

Надежность – вероятность исправной работы элемента (системы) в течение заданного времени при определенных условиях эксплуатации. Более общее определение по [5] таково: "Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных"

режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонт, хранения и транспортирования".

Невосстановимое устройство — устройство, работа которого после отказа считается невозможной и восстановлению не подлежит.

Отказ — событие, заключающееся в полной или частичной потере элементами (системой) работоспособности. При этом параметры устройства отклоняются за допустимые пределы. В свою очередь, отказы по характеру их проявления подразделяются на *внезапные, постепенные и перемежающиеся*.

Внезапный отказ — отказ элемента, возникающий в результате резкого изменения нагрузки. Возникает случайно, неожиданно. Именно этот вид отказа характерен для большинства технических устройств в период эксплуатации. Причины отказа могут быть технологического и конструктивного характера, но отказ может возникнуть и в результате нарушения условий эксплуатации. Время возникновения внезапного отказа предсказать нельзя, но количество отказов за выбранный промежуток времени может быть определено. В ислыдном случае возможно внезапные отказы (причиной которых является недостаток конструкции, эксплуатации или ремонта) устранить полностью.

Постепенный отказ — отказ, возникающий в результате изменения свойств элемента. Обычно вызывается старением (износом). Время его возникновения может быть предсказано с большой точностью, а, следовательно, он может быть своевременно устранен.

Параметрический отказ — отказ, характеризующийся отклонением значения хотя бы одного из рабочих параметров объекта за пределы допуска. По устранении возмущающего воздействия рабочий параметр может вернуться в зону допуска, и система будет продолжать нормально функционировать. Определение причин параметрических отказов затруднительно, так как в большинстве случаев они возникают кратковременно. Однако в настоящее время уже разработаны некоторые методы определения параметрических отказов (параметрической надежности) для тепловых систем [14].

Полный отказ — отказ, до устранения которого система непригодна для выполнения требуемой работы.

Повреждение — переход объекта в несправное, но работоспособное состояние.

Предельное состояние — состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно (или восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно)

Работоспособное состояние — состояние, при котором значения всех параметров объекта, характеризующие его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации. В *неработоспособном* состоянии объект (или) конструкция не удовлетворяет требованиям документации.

Ремонтопригодность — свойство системы, выражающееся в способности ее к обнаружению и устранению отказа. Для аналогичных систем различных серий локомотивов ремонтпригодность равна времени, необходимому для обнаружения и устранения неисправности.

Среднее время безотказной работы — время работы до первого отказа. Обычно определяется для однотипных элементов.

Средняя наработка на отказ — время между двумя отказами. Является одним из важнейших показателей для восстанавливаемых систем. Для периода нормальной эксплуатации равна среднему времени безотказной работы.

Частичный отказ — отказ, до устранения которого остается возможность использовать систему по назначению.

Частота отказов — число отказов в выбранный период времени, отнесенное к общему числу работающих в этот период однотипных элементов (систем).

Определение таких понятий, как *элемент* и *система*, в каждом конкретном случае требует уточнения. Так, локомотив в целом может рассматриваться как система, тогда элементами являются отдельные узлы энергетической установки. В свою очередь каждый узел может рассматриваться как система, состоящая из ряда элементов.

Иногда (например, при оценке надежности систем железнодорожной автоматики, к которым относятся применяемые на локомотивах устройства АЛСЧ, радиосвязи и контроля бдительности машиниста), дополнительно к *исправному, неисправному, работоспособному, работоспособному и предельному* состояниям вводят дополнительно понятия, определяемые ГОСТ 32.17-92 "Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Термины и определения", например [12, с. 9].

Защитное состояние — работоспособное состояние системы, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движения поездов, соответствующим требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Опасное состояние — работоспособное состояние системы, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции по обеспечению безопасности движе-

ния поездов, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Защитный отказ – событие, заключающееся в нарушении рабочего способного состояния системы при сохранении защитного состояния.

Опасный отказ – нарушение работоспособного и защитного состояния системы.

Этими терминами целесообразно пользоваться, например, при анализе надежности тормозного оборудования локомотива или всей тормозной сети поезда.

1.2. Критерии надежности

Надежность рассматривается как внутреннее свойство системы, как ее параметр. Для полной оценки надежности одной вероятностной оценки мало. Нужны количественные характеристики – *критерии надежности*, т.е. признаки, по которым можно судить о надежности рассматриваемой системы.

Количественные значения критериев надежности называются *характеристиками надежности*, которая и является технической характеристикой системы. Критерии надежности делятся на несколько групп:

- 1) *критерии безотказности* – вероятность безотказной работы, частота отказов, интенсивность отказов, среднее время безотказной работы, наработка на отказ;
- 2) *критерии восстанавливаемости* – вероятность восстановления, среднее время восстановления, интенсивность восстановления;
- 3) *эксплуатационные критерии* – коэффициент использования, коэффициент готовности, коэффициент простоя, коэффициент стоимости эксплуатации.

Для критериев безотказности и восстанавливаемости теория надежности предусматривает два вида определений: *вероятностное* и *статистическое* (экспериментальное). В последних определяемая величина пишется со знаком “~” (“тильда”).

Рассмотрим каждый критерий в отдельности.

Вероятностная безотказная работа $P(t)$ – самый распространенный критерий надежности. Экспериментально определяется как отношение

$$P(t) = \frac{N \dots n}{N} \quad (1.1)$$

где N – число эксплуатируемых и рассматриваемых период времени t отдельных элементов;

n – число отказавших элементов за тот же период времени.

Вероятность безотказной работы (ВБР) может быть вычислена по выражению

$$P(t) = \exp(-\lambda t) = \exp(-t / T_0), \quad (1.2)$$

где $\lambda = 1 / T_0$ – интенсивность отказов за время T_0 во взаимосвязи с другими показателями надежности. Как видно из формулы (1.2), график изменения $P(t)$ – экспонента. Для подвижного состава временным фактором может служить величина пробега, выраженная в километрах. Значения $P(t)$ для локомотивов разных серий находятся в пределах 0,6 ... 0,85; в то же время надежность авиационных и военных систем исчисляется несколькими десятками после запятой (0,9999 и т.д.). Чем это объяснить?

$P(t)$ можно представить как вероятность того, что время T исправной работы объекта будет больше некоторого заданного времени t_3 (вероятностное определение):

$$P(t) = P(T > t_3). \quad (1.3)$$

Чем больше выбранный промежуток времени, тем меньше вероятность безотказной работы.

Вероятность отказа есть событие, заключающееся в том, что время работы объекта будет меньше заданного, то есть

$$Q(t) = P\{T < t_3\}. \quad (1.4)$$

Статистическое определение:

$$Q(t) = \frac{n}{N}. \quad (1.5)$$

Так как отказ и безотказная работа являются, с точки зрения теории вероятности, противоположными событиями, то на основании теоремы сложения вероятностей

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (1.6)$$

Частота отказов $f(t)$ определяется статистически как

$$f(t) = \frac{\Delta n_i}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.7)$$

где Δn_i – число отказавших элементов за время Δt .

Вероятностное определение:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Отказавшие элементы не заменяются новыми, поэтому общее их число уменьшается.

Если отказавшие элементы заменяются новыми, что характерно для работы локомотивов, то $f_{\text{op}} = \Delta n_i / (N \cdot \Delta t)$ называется *средней частотой отказов*. Достоинством этого критерия является возможность судить о количестве элементов, которые могут отказать за определенный промежуток времени. Иногда частоту отказов называют *средней скоростью наступления отказов*.

Имеем f_{op} , можно определить ожидаемый выход из строя узлов за любой промежуток времени.

Интенсивность отказов λ_i — показатель, характеризующий надежность i -го элемента в каждый данный момент времени, является универсальной характеристикой невосстанавливаемых элементов. Статистически определяется из уравнения

$$\lambda_i = \frac{\Delta n_i}{(N - n_i) \Delta t} \quad (1.9)$$

где n_i — число отказавших элементов с начала эксплуатации до рассматриваемого периода включительно;

Δn_i — число отказавших элементов за время Δt ;

N — начальное число элементов.

Следовательно, интенсивность отказов показывает, какая доля от работающих в некоторый момент времени элементов отказывает в единицу времени после этого момента.

Вероятностное определение:

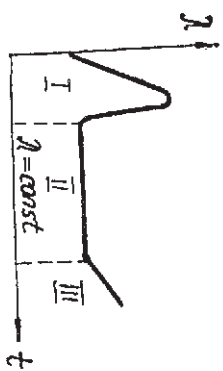
$$\lambda = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{d/dt[P(t)]}{1 - Q(t)} \quad (1.10)$$

Значения λ получают в результате обработки эксплуатационных и экспериментальных материалов. Для локомотивной источник сведений об отказах является материал локомотивных депо.

Если по рассчитанным частным значениям λ для отдельных элементов построить кривую, то получаем функцию интенсивности отказов $\lambda = f(t)$, которую называют *лямбда-характеристикой* (рис. 1.1).

На кривой $\lambda = f(t)$ можно выделить три характерных участка: I — приработочные отказы, зависящие от технологических причин и выявляемые в результате испытаний изделия после изготовления или ремонта, 2 — отказы, зависящие от случайных концентраций нагрузки либо внешних воздействий, возникающих в период нормальной эксплуатации устройства, 3 — износные отказы, появляющиеся в результате износа и старения элементов. Появление износных отказов может служить критерием долговечности устройства.

Рис. 1.1. Лямбда-характеристика отказов



Среднее время безотказной работы T_{bp} — это математическое ожидание времени исправной работы элементов. Определяется по статистическим данным по формуле

$$T_{\text{bp}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \quad (1.11)$$

где t_i — время исправной работы i -го элемента;

N — общее число испытываемых элементов.

Для восстанавливаемых систем T_{bp} отражает время эксплуатации до первого отказа.

Наработка на отказ T_o — критерий надежности, более удобный для практики. Степень надежности в этом случае оценивается средним числом часов работы между двумя отказами T_r , взятыми за определенное время эксплуатации T_3 :

$$T_o = \frac{T_r}{T_3} \quad (1.12)$$

Наработка может определяться как в часах, так и в километрах пробега:

$$l_o = \frac{l_p}{l_3} \quad (1.13)$$

Наработка на отказ восстанавливаемых элементов служит мерой их *безотказной работы*. Оценкой измерения безотказной работы восстанавливаемого оборудования является *параметр потока отказов*, который определяют экспериментально как отношение числа отказов оборудования за достаточно малый интервал времени Δt к общему числу N единиц этого оборудования и выбранному интервалу времени:

$$\omega(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} \quad (1.14)$$

Вероятность восстановления P_v — вероятность того, что отказавший элемент будет восстановлен за заданное время t_p при известных условиях ремонта.

Опыт показывает, что распределение продолжительности устранения отказов подчиняется экспоненциальному закону.

Среднее время восстановления T_v принимается как среднее арифметическое время, необходимое для восстановления отказавшего узла:

$$T_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (1.15)$$

На время T_v оказывает влияние квалификация ремонтного персонала.

Интенсивность восстановления μ — величина, обратная среднему времени восстановления:

$$\mu = \frac{N}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (1.16)$$

Этот показатель характеризует производительность работ.

Коэффициент использования локомотива K_u — отношение времени работы локомотива за месяц $\sum I_{\text{раб}}$ к календарному времени T_k :

$$K_u = \frac{\sum I_{\text{раб}}}{T_k} \quad (1.17)$$

Коэффициент готовности K_r — отношение времени готовности локомотива к эксплуатации $\sum I_r$ к календарному времени T_k . Время $\sum I_r$ включает в себя время работы локомотива $\sum I_{\text{раб}}$ и время простоя в ожидании работы $\sum I_{\text{опр}}$:

$$K_r = \frac{\sum I_{\text{раб}} + \sum I_{\text{опр}}}{T_k} = \frac{\sum I_r}{T_k} \quad (1.18)$$

Данный коэффициент определяет вероятность того, что локомотив будет готов к удовлетворительному выполнению своих функций в любой момент текущего времени.

Коэффициент простоя K_n — отношение времени простоя локомотива во всех видах осмотров и ремонтов $\sum I_n$ к календарному времени T_k :

$$K_n = \frac{\sum I_n}{T_k} \quad (1.19)$$

где $\sum I_n$ — время простоя локомотивов во всех видах ремонтов и осмотров и в ожидании их.

Подобно K_r , коэффициент простоя определяет вероятность того, что локомотив будет находиться в простое по причине планового или внепланового ремонта в любой момент текущего времени.

Следует заметить, что $K_r + K_n = 1$.

Коэффициент ремонтопригодности K_p — отношение времени на поиск и устранение неисправности $\sum I_n$ к сумме этого времени и времени работы локомотива $\sum I_{\text{раб}}$:

$$K_p = \frac{\sum I_n}{\sum I_n + \sum I_{\text{раб}}} \quad (1.20)$$

Следует заметить, что сумма K_r и K_p также равна 1.

Кроме того, *ремонтпригодность* сама по себе есть вероятность восстановления удовлетворительной работы системы в течение заданного времени, то есть

$$P_{\text{рем}}(t) = \exp(-Mt), \quad (1.21)$$

где M — средняя скорость (интенсивность) ремонта.

Показатели ремонтпригодности более подробно разобраны в п. 1.4.

Коэффициент стоимости эксплуатации $K_{\text{св}}$ служит для оценки расхода средств, необходимых для поддержания оборудования локомотивов в надлежащем состоянии в процессе эксплуатации:

$$K_{\text{св}} = \frac{C_1}{C_0} \quad (1.22)$$

где C_1 — стоимость обслуживания локомотивов в течение года;

C_0 — строительная стоимость локомотивов.

Чем выше надежность, тем ниже стоимость обслуживания локомотивов. В стоимость C_1 не включаются расходы депо, необходимые для обеспечения поездной работы (локомотивные бригады, работники экипировки, нарядчики и т.д.).

За 1 млн. км пробега затраты на ремонт составляют: для электропоезда ВП10 — 60 % строительной стоимости; для тепловоза типа ТЭ10 — 85 %.

Перечисленные критерии надежности позволяют всесторонне и полно судить о надежности рассматриваемой системы или тепловоза в целом и могут применяться при проектировании новых локомотивных систем.

1.3. Экспериментальная оценка надежности

Теоретические расчеты дают, как правило, приближенное представление о надежности. Точные результаты можно получить только на основе обработки данных реальной эксплуатации, когда учитываются все многообразные воздействия на систему и их корреляционные связи.

Однако для получения достоверных показателей надежности эксперимент становится весьма сложным: исследуется большое количество объектов в довольно длительный период эксплуатации. Поэтому целесообразно использовать метод планирования эксперимента.

Суть метода заключается в следующем: необходимо определить значение какого-то параметра y , который находится в зависимости от нескольких параметров $x_1, x_2, \dots, x_k$, то есть с математической точки зрения является функцией нескольких переменных. Эти переменные называются факторами. Связь их с исследуемым параметром y выражается уравнением, вид которого определяется некоторыми коэффициентами $a_0, a_1, \dots, a_k$. Такое уравнение называется *уравнением регрессии*, а сам эксперимент — *матрицей факторной*.

В случае многофакторного эксперимента уравнение регрессии имеет вид

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^m a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{k=1}^m a_{ijk} x_i x_j \dots x_k, \quad (1.23)$$

где y — исследуемый параметр;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ — коэффициенты уравнения;
 $x_1, x_2, \dots, x_k$ — факторы, влияющие на исследуемую величину.

Как правило, для факторов устанавливаются лишь два предельных уровня: нижний (—) и верхний (+). Такой эксперимент называется *двухуровневым*.

При числе факторов, превышающем 2, вычисления величины y становятся затруднительными даже при наличии современной вычислительной техники. Поэтому, как правило, ограничиваются двумя факторами.

Такой полнофакторный эксперимент обозначается как ПФЭ² (двухфакторный, двухуровневый). Уравнение регрессии в этом случае принимает вид

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2. \quad (1.24)$$

В случае ПФЭ² определяются лишь четыре значения y в соответствии с матрицей влияний:

x_1	x_2	y
+	+	y_1
+	—	y_2
—	+	y_3
—	—	y_4

Коэффициенты уравнения a_0, a_1, a_2, a_{12} рассчитываются по специальным формулам [6]. Определив их, можно вычислить значения y_1, y_2, y_3, y_4 при всех сочетаниях граничных значений x_1 и x_2 . Более подробно методы теории планирования эксперимента будут рассмотрены ниже.

Если нам надо лишь определить, лежит ли исследуемый параметр y в каких-либо границах, то методика эксперимента будет иной. Допустим, необходимо определить *основной показатель безотказности и долговечности* — *среднее значение наработки на отказ* T_{cp} — и ее граничные значения T_{min} и T_{max} .

Понятно, что

$$T_{min} < T_{cp} < T_{max}. \quad (1.25)$$

Значения T_{min} и T_{max} определяются по уравнениям

$$T_{\min} = T_{\text{ср}} - t_{p/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n-1}}; \quad (1.26)$$

$$T_{\max} = T_{\text{ср}} + t_{p/2}(n-1) \frac{S}{\sqrt{n-1}}; \quad (1.27)$$

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \quad (1.28)$$

где n — число отказов;

T_i — наработка на отказ i -го тепловоза или элемента;

N — число однотипных испытываемых тепловозов (элементов);

S — оценка среднеквадратического отклонения параметра $T_{\text{ср}}$;

$t_{p/2}$ — величина, зависящая от числа опытов и доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$, где α — заданная точность определения показателей надежности.

S^2 называется дисперсией и определяется как

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{ср}})^2. \quad (1.29)$$

Следовательно,

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{\text{ср}})^2}. \quad (1.30)$$

Величина $t_{p/2}$ определяется по табл. 1.1.

Таблица 1.1

n	α						
	0,50	0,25	0,10	0,05	0,01	0,005	
1	2	3	4	5	6	7	
1	1,000	2,414	6,314	12,706	63,957	27,320	
2	0,817	1,604	2,920	4,303	9,925	14,089	
3	0,765	1,423	2,353	3,183	5,841	7,453	
4	0,741	1,344	2,132	2,776	4,604	5,598	

Продолжение табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
5	0,727	1,301	2,015	2,571	4,032	4,773
6	0,718	1,273	1,943	2,447	3,707	4,317
7	0,711	1,254	1,895	2,365	3,500	4,029
8	0,706	1,240	1,860	2,306	3,355	3,832
9	0,703	1,230	1,833	2,262	3,250	3,690
10	0,700	1,221	1,813	2,228	3,169	3,581
15	0,691	1,197	1,753	2,132	2,947	3,286
20	0,687	1,185	1,725	2,086	2,845	3,153
25	0,684	1,178	1,708	2,060	2,787	3,078
30	0,683	1,173	1,697	2,042	2,750	3,030
40	0,681	1,167	1,689	2,021	2,705	2,971
60	0,679	1,162	1,671	2,000	2,660	2,915
120	0,677	1,156	1,658	1,980	2,617	2,860
∞	0,674	1,150	1,645	1,960	2,576	2,807

При обработке статистического материала в депо можно определить следующие величины:

$T_{\text{ср}}$ — суммарная наработка группы локомотивов (или группы элементов);

t_n — суммарное время восстановления локомотивов (или групп элементов);

T_n — суммарное время восстановления локомотивов (или групп элементов). Выражается в часах.

В соответствии с ОСТ 32... 96 "Порядок разработки и оценки результатов мероприятий по повышению надежности тепловозов" [10] среднее значение наработки до первого отказа и значение параметра потока отказов применяются для оценки безотказности тепловозов, а среднее значение наработки до предельного состояния — для оценки их долговечности. Нарботка до отказа (или предельного состояния), как указывалось выше, может выражаться как в часах, так и в километрах пробега.

1.4. Показатели ремонтопригодности

Исследование ремонтопригодности связано с двумя характерными для нее сторонами: технической и организационной. С одной стороны, быстрота восстановления любой локомотивной системы зависит от сложности последней, ее конструктивных особенностей, возможности замены элементов, доступа к ним и других факторов, которые закладываются на этапе проектирования. С другой стороны, быстрота восстановления зависит от особенностей размещения элементов и систем на локомотиве, а также от квалификации обслуживающего персонала и других факторов, непосредственно не связанных с конструкцией локомотива. Поэтому при анализе

за ремонтнопригодности необходимо учитывать как технические, так и организационные факторы.

Как указывалось в п. 1.2., *ремонтопригодность* есть вероятность восстановления удовлетворительной работы системы в течение заданного времени, то есть

$$P_{\text{рем}}(t) = \exp(-Mt), \quad (1.31)$$

где M — средняя скорость (интенсивность) ремонта.

Данное выражение не учитывает обеспечения ремонтного производства персоналом и затрат времени на техническое обслуживание локомотивов или их элементов. Это происходит потому, что величина M учитывает время, затраченное только на восстановление работоспособности системы (элемента) в случае возникновения отказа:

$$M = \frac{1}{T_{\text{рем}}}, \quad (1.32)$$

где $T_{\text{рем}}$ — средняя продолжительность восстановления работоспособности системы (элемента) после возникновения отказа.

Это время можно разбить на составляющие:

- $T_{\text{рем1}}$ — обнаружение (установление факта возникновения отказа);
- $T_{\text{рем2}}$ — подготовка инструмента, приспособлений, приборов;
- $T_{\text{рем3}}$ — отыскание неисправности;
- $T_{\text{рем4}}$ — обеспечение запасными частями и материалами для ремонта;
- $T_{\text{рем5}}$ — замена и восстановление неисправных элементов;
- $T_{\text{рем6}}$ — проведение необходимых регулировок;
- $T_{\text{рем7}}$ — контроль качества ремонта (приемка, испытания и т.п.);
- $T_{\text{рем8}}$ — организационные потери времени;
- $T_{\text{рем9}}$ — потери времени из-за отсутствия запчастей, инструмента и т.п.

Такие составляющие, как $T_{\text{рем3}}$, $T_{\text{рем5}}$, $T_{\text{рем6}}$ и $T_{\text{рем7}}$ зависят от свойств системы, заложенных при ее разработке, и могут быть названы *техническими элементами ремонтопригодности*. Время $T_{\text{рем2}}$ может являться этим элементом лишь в той мере, в какой оно зависит от имеющегося на локомотиве (при устранении отказа в поездке) или в депо ремонтного и диагностического инструмента, приспособлений и приборов. Время $T_{\text{рем1}}$ также зависит как от наличия индикации отказа на пульте машиниста (сигнальные лампы, указатель повреждений), так и от квалификации локомотивной или ремонтной бригады и поэтому техническим элементом является лишь отчасти.

Для расчета затрат времени на восстановление работоспособности необходимо знать частоту замены деталей. Так как параметр λ в формуле (1.2) не учитывает оппозвременных (зависимых) отказов, то при расчете ремонтнопригодности целесообразно использовать не *интенсивность отказов*, а *интенсивность замены деталей* данного типа $\lambda_{\text{ж}}$, определяемую аналогично λ :

$$\lambda_{\text{ж}} = \frac{\Delta n_{\text{ж}}}{(N - n_{\text{ж}}) \Delta t}, \quad (1.33)$$

где $n_{\text{ж}}$ — число замененных элементов i -го типа с начала эксплуатации до рассматриваемого периода включительно;

$\Delta n_{\text{ж}}$ — число замененных элементов i -го типа за время Δt ;

N — начальное число элементов.

Также используется *коэффициент одновремениости замены деталей* $K_{\text{од}}$, равный среднему количеству деталей, заменяемых при устранении одного отказа, и определяемый как отношение общего количества замененных деталей к общему количеству ремонтов или устраненных отказов системы:

$$K_{\text{од}} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{\text{ж}}}{N_{\text{рем}}}. \quad (1.34)$$

В этой формуле через k обозначено число типов заменяемых элементов, практически определить величину числителя очень легко, так как в ремонтном производстве, как правило, ведется учет расхода запасных частей. Поэтому для вычисления этого коэффициента достаточно знать, сколько деталей разного типа было заменено при всех ремонтах системы.

Средняя для системы продолжительность замены одной детали определяется как

$$T = 1 / M = \frac{N_1 \lambda_{\text{ж1}} + N_2 \lambda_{\text{ж2}} + \dots + N_m \lambda_{\text{жm}}}{N}, \quad (1.35)$$

где M — средняя продолжительность восстановления одной детали;

$N_1, N_2, \dots, N_m$ — количество деталей первого, второго, ..., m -го типа;

$\lambda_{\text{ж1}}, \lambda_{\text{ж2}}, \dots, \lambda_{\text{жm}}$ — интенсивность замены деталей первого, второго, ..., m -го типа;

$M_1, M_2, \dots, M_m$ — интенсивность восстановления деталей первого, второго, ..., m -го типа;
 N — полное количество деталей в системе.

Таким образом, средняя продолжительность устранения одного отказа системы может быть определена как

$$T_{\text{рем}} = K_{\text{од}} \cdot T. \quad (1.36)$$

С другой стороны, этот же параметр может быть определен, если известна продолжительность устранения отказа любого i -го элемента системы и интенсивность отказов этого i -го элемента. Тогда при числе элементов в системе, равном N , средняя продолжительность отказа системы определяется по формуле

$$T_{\text{рем}} = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i T_{\text{рем}i}}{N}. \quad (1.37)$$

В соответствии с [10] показателями ремонтпригодности являются:

среднее операционное время восстановления, определяемое

$$T_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (1.38)$$

где τ_i — операционное время восстановления работоспособности i -го теплового (элемента оборудования) после отказа;

N — число однотипных испытываемых тепловозов (элементов оборудования);

средняя трудоемкость восстановления, чел.-ч:

$$S_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{bi}, \quad (1.39)$$

где S_{bi} — трудоемкость замены i -го элемента оборудования после отказа;

средняя стоимость восстановления, руб.:

$$C_b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_{bi}, \quad (1.40)$$

где C_{bi} — стоимость замены и ремонта элемента оборудования после отказа.

При оценке ремонтпригодности элемента в соответствии с этим стандартом под *восстановлением* понимают ремонт элемента без учета снятия и постановки на тепловоз.

2. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ И СИСТЕМ ЛОКОМОТИВОВ

2.1. Расчет надежности с учетом взаимосвязанных отказов

В простейшем случае, когда отказы независимы и происходят в случайные моменты времени и среднее значение числа отказов одинаково для равных по длительности периодов работы, надежность устройства определяется экспоненциальной формулой

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (2.1)$$

где λ — интенсивность отказов;

t — время работы, для которого определяется надежность.

Вывод этой зависимости изложен в некоторой специальной литературе по надежности. Интересующихся этим вопросом авторы адресуют к [7, с. 17–22], [4, с. 18–19].

Особенностью полученной информации о величине λ является весьма большой разброс ее значений. Однако приведенные в отечественной и зарубежной литературе данные вполне можно использовать для ориентировочных расчетов.

Вычисленное значение $P(t)$ представляет собой вероятность того, что устройство с интенсивностью отказов λ не откажет в течение времени t . Эта формула справедлива для всех устройств, которые прошли приработку и не испытывают пока влияния износа и старения. Период работы, для которого справедливо выражение (2.1), называется *нормальной эксплуатацией устройства*.

Длительность этого периода отличается для различных устройств, однако время в формуле никогда не может быть больше периода нормальной эксплуатации устройства. В период нормальной эксплуатации надежность устройства примерно одинакова для равных по длительности периодов работы, но с увеличением общего времени работы надежность снижается. Например $P(t)$ для элемента с $\lambda = 0,0001$ 1/ч для отрезка времени 10 ч, выбранного в любом месте периода нормальной эксплуатации устройства, составит

$$P(t) = e^{-0,0001 \cdot 10} = 0,999.$$

Вероятность того, что устройство не откажет за период работы, равный 1000 ч, составит

$$P(t) = e^{-0,00011000 t} = 0,905.$$

Параметр λ в этом случае полностью определяет надежность устройства. При предварительной оценке надежности устройств удобно пользоваться обратной величиной, называемой *средней наработкой на отказ* m , которая равна

$$m = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.2)$$

На рис. 2.1 приведен график $P(t)$. Отметим, что абсцисса t не измеряет общего времени работы устройства. Она отражает только часы произвольно выбранного периода работы, начало которого в частном случае может совпадать и с началом работы устройства в эксплуатации.

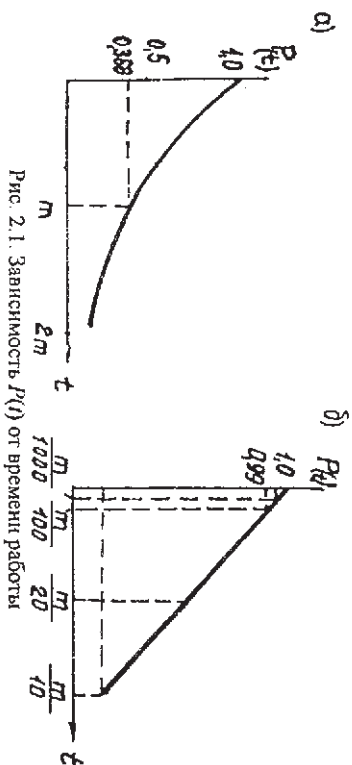


Рис. 2.1. Зависимость $P(t)$ от времени работы

При определении надежности устройства обычно требуется найти вероятность безотказной работы в течение интересующего отрезка времени, длительность которого всегда много меньше средней наработки на отказ. Следовательно, расчет надежности производится для промежуточных времени, которые соответствуют крайней левой части кривой надежности (рис. 2.1, а). На кривой, представленной на рис. 2.1, б, нанесен ряд точек, которые легко запомнить и с помощью которых можно производить первое грубое представление надежности устройства. Так, вероятность безотказной работы устройства в течение интервала времени $t = m$ равна 0,368 ($\approx 0,37$); для $t = m/10$ $P(t) = 0,9$; для $t = m/100$ $P(t) = 0,99$ и т.д.

Эти точки на кривой надежности применимы к любым элементам и системам при учете только внезапных отказов с частотой λ . Следовательно, зависимость $P(t)$, в которой m используется как единица времени, является *универсальной кривой надежности*.

Система, состоящая из n одинаковых элементов, у каждого из которых средняя наработка на отказ равна m , будет иметь среднюю наработку на отказ m/n , если отказ любого из этих элементов вызывает отказ системы (последовательное соединение). Это замечание также относится и к немодотным элементам, если под m понимать среднее значение наработок на отказ неоднотипных элементов.

Для оценки надежности сложной системы (тепловоз или его узлы) в первую очередь необходимо установить, каким образом отдельные элементы влияют на безотказность системы в целом. Обычно считают, что система выходит из строя при отказе хотя бы одного входящего в нее элемента и отказы отдельных элементов независимы. В этом случае $P(t)$ резервируемой системы с учетом только внезапных отказов при условии, что все элементы работают одновременно, может быть определено по выражению

$$P(t) = P(t)_1 \cdot P(t)_2 \cdot P(t)_3 \dots P(t)_n = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2.3)$$

где n — число элементов, составляющих систему;

$P(t)$ — надежность i -го элемента.

Таким образом, надежность любой системы определяется произведением вероятностей $P(t)$ входящих в нее элементов.

Для оценки надежности системы в целом без разбивки ее на звенья или смысловые блоки можно использовать величину *суммарной интенсивности отказов* λ системы, равную сумме интенсивностей отказов элементов, входящих в эту систему:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (2.4)$$

Обычно локомотивная система объединяет несколько групп аналогичных элементов. Для любых элементов интенсивность отказов, а, следовательно, и надежность, зависит от режимов работы и времени.

На первом этапе расчета — при определении надежности только с учетом внезапных отказов, когда еще не известны режимы работы — можно предположить, что все элементы системы работают в номинальном режиме, т.е. интенсивность отказов у них постоянна и равна табличным значениям. В табл. 2.1 приведены значения интенсивности отказов λ и долговечности M для наиболее часто встречающихся элементов тепловозных систем.

Таблица 2.1

Наименование элементов	λ	M
1	2	3
Автотрансформаторы	0,25	0,05
Аккумуляторы	7,2	0,008 вкл.
Амперметры	0,29	1,0 изм.
Баки	1,5	—
Воздухоуловки	2,23	—
Выключатели быстройдействующим	0,4	0,02
Гасители колебаний гидравлические	0,037	—
Генераторы переменного тока	0,7	0,001
Генераторы постоянного тока	12,4	0,006
Датчики давления	3,5	0,35
Датчики температуры	3,3	0,01
Двигатели асинхронные	2,25	0,007
Диоды германиевые:		
малой мощности	0,3	0,0006
силовые	0,6	0,0003
Диоды кремниевые:		
малой мощности	0,564	0,004
силовые	7,0	0,0008
Изоляторы	0,05	—
Изоляция	0,5	0,05
Кабели (в сборе на схему)	0,2	—
Катушки высокого напряжения	0,4	0,009
Катушки реле и индуктивности	0,02	0,15
Катушки настроечные	0,15	0,08
Катушки солсеноидные	0,04	0,08
Клапаны	5,1	0,15 сраб.
Конденсаторы электромашины	2,9	—
Конденсаторы бумажные	0,05	0,01
Контакты (на главный контакт)	0,25	0,05 вкл.
Контакты вспомогательные	0,3	0,04 вкл.
Коробки передач (редукторы)	0,63	0,04
Дампы накопления	0,64	0,01
Манометры гидравлические	0,12	0,1 изм.
Муфты фрикционные	0,3	—
Муфты электроматитные	0,6	—
Насосы с механическим приводом	13,5	—
Обмотки электрических машин	0,03	0,05
Передачи зубчатые	0,12	—
Подшипники легкой серии	0,875	0,006
Потенциометры проволоочные	1,2	0,002
Предохранители плавкие	0,5	—
Приводы ремешные	3,87	—
Поршни гидравлические	0,2	—

Продолжение табл. 2.1

1	2	3
Пружины	0,22	—
Пусковые двигатели (стартеры)	10,0	—
Радиаторы	4,2	—
Регуляторы давления	4,25	0,0015
Регуляторы напряжения (типа СРН)	8,82	0,02
Резисторы проволоочные	0,13	0,03
Реле общего назначения	0,25	0,2 цикл.
Реле пневматические	0,35	—
Реле температуры	0,4	0,2 цикл.
Реле электромагнитные	0,3	0,003
Сопроптивления нерегулируемые	0,087	0,01
Сопроптивления переменные	0,06	0,016
Тахометры	0,3	0,01
Термостаты	0,3	0,25 цикл.
Транзисторы германиевые	0,53	0,14
Транзисторы кремниевые	0,74	—
Трансформаторы	0,2	0,01
Тумблеры	0,06	0,05
Усилители магнитные	0,085	—
Шланги дюрнитовые	2,0	—
Щетки электрических машин	0,1	0,003
Щетки электродвигателей	1,3	—

Примечания: 1. При умножении данных гр. 2 на 10^4 — размерность $1/\text{ч}$; при умножении данных гр. 3 на 10^5 — размерность в часах, если нет наименования.

2. Значения параметров λ и M в таблице могут быть использованы только для учебных расчетов надежности.

2.2. Расчет надежности с учетом старения элементов

Расчет надежности элементов и систем с учетом старения и износа производится с целью определения сроков профилактических ремонтов и замены элементов. Замена элементов и текущие ремонты необходимы в тех случаях, когда время эксплуатации устройства превышает срок службы элементов $T_{\text{п}}$, входящих в это устройство, что обычно справедливо для всех промышленных и транспортных устройств. В результате ремонта аппаратура и сборочные единицы приходят в такое состояние, когда вероятность отказа незначительна. Система с правильно выбранным периодом профилактики практически не стареет несмотря даже на то, что остаются некоторые отказы, возникающие внезапно.

Для износных отказов характерен *нормальный закон распределения* (рис. 2.2), то есть зависимость вероятности безотказной работы от времени работы (долговечности) подчиняется этому закону. Прием примерно по-

ловина отказов возникает до момента, соответствующего *среднему значению* (математическому ожиданию) долговечности элемента M , а половина — после этого момента. Поэтому надежную работу элемента можно получить для интервала времени, близкого по значению к долговечности элемента.

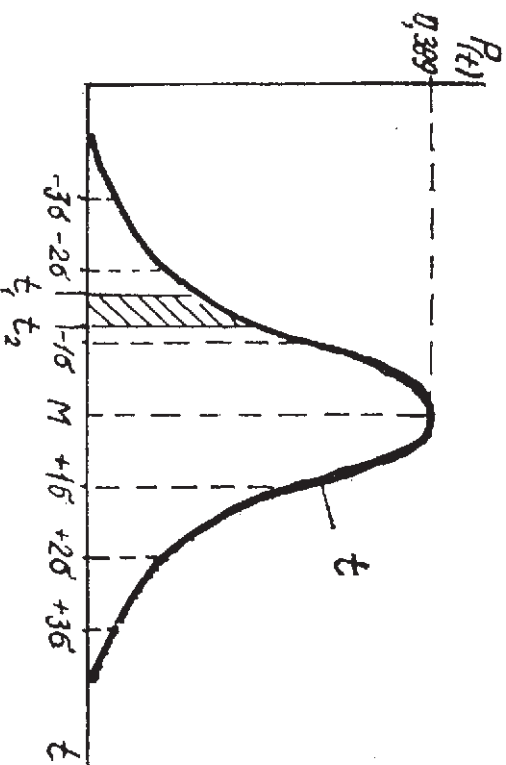


Рис. 2.2. График нормального распределения плотности вероятности

У большинства элементов тепловозных систем значение M меньше значения наработки на отказ m . Физически это означает, что если бы даже этот элемент имел почти стопроцентную БВР, то она сохранилась бы лишь в течение короткого периода времени от момента ввода в эксплуатацию T_0 до времени восстановления T_n (в идеальном случае численно равным значению M). Далее, если элемент не будет изъят из употребления или отремонтирован, то весьма вероятным становится его отказ или от случайного повреждения (превышения значения параметра предельно допустимой нагрузки), или от износа.

Общий вид и характеристики нормального закона распределения случайной величины, роль которой в нашем случае играет *время до отказа элемента* t , достаточно хорошо изложены в литературе по теории вероятностей, математической статистике и теории надежности [1] — [4], [7], [13].

Функция распределения — вероятность того, что за время t возникнет отказ — определяется формулой

$$Q(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left\{-(t-M)^2/2\delta^2\right\} dt. \quad (2.5)$$

Плотность распределения вероятности отказа для времени t

$$f(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-(t-M)^2/2\delta^2\right\} dt, \quad (2.6)$$

где M — средняя долговечность;

t — время эксплуатации или общее время работы системы;

σ — среднеквадратическое отклонение времени t от средней долговечности M , определяемое по формуле

$$\delta = \sqrt{\Sigma(t-M)^2 / N}. \quad (2.7)$$

Величина N обозначает число отказов, происходящих спустя время t , которое суммируется в выражении $\Sigma(t-M)^2$.

Известно, что общая площадь под кривой плотности вероятности равна единице. Поэтому любой участок этой площади — например от t_1 до t_2 (см. рис. 2.2) — указывает нам *долю отказов* за данный промежуток времени.

Полную вероятность отказа для периода от $t = 0$ до $t = T_n$ определяют площадь, находящаяся с *левой стороны* от T_n . Расчет надежности элементов по износу сводится, таким образом, к построению кривой $f(t)$, для чего необходимо располагать величинами M и m .

В качестве M при проектировании можно принять гарантийный срок работы элемента, указываемый в его паспорте, техническом описании или иной документации. Для учебных расчетов можно воспользоваться данными табл. 2.1.

Значения наработки на отказ определяются исходя из конкретных эксплуатационных условий для каждого элемента по (1.12) или (1.13). Надо только выбрать параметр, относительно которого определяются вероятностные показатели: время работы или величина пробега.

Значения δ могут быть определены только при обработке статистических данных. Эта величина может изменяться в очень широких пределах. При учебных расчетах δ может приниматься в пределах (0,1 ... 0,3) M .

Для упрощения расчетов можно пользоваться рис. 2.3.

В этом случае используется универсальная функция плотности отказов, выраженная в единицах стандартного отклонения:

$$\Phi(t) = \delta(t). \quad (2.8)$$

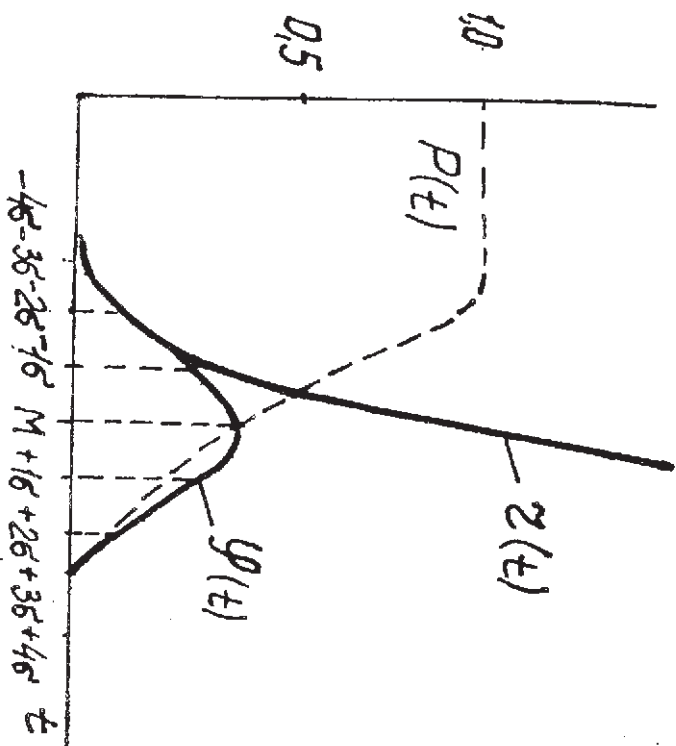


Рис. 2.3. График зависимостей показателей надежности от времени

Значения $\Phi(t)$ вместе со значениями $P_n(t)$ могут быть получены непосредственно из таблиц нормального распределения. Таким путем получается универсальная функция интенсивности отказов:

$$r(t) = \frac{\Phi(t)}{P_n(t)}, \quad (2.9)$$

откуда интенсивность износных отказов

$$\lambda_n = \frac{f(t)}{P_n(t)} = \frac{\Phi(t)}{\delta P_n(t)} = \frac{r(t)}{\delta}. \quad (2.10)$$

Определив λ_n , можно установить момент времени T_n , когда элемент должен быть изъят из употребления и заменен, чтобы предотвратить износный отказ во время работы. Время замены элемента T_n выбирается так, чтобы интегральная вероятность износного отказа $Q(t)$ оставалась на минимально приемлемом уровне в соответствии с требованиями к надежности данного устройства. Величина $Q(t)$ определяется по формуле

$$Q(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt, \quad (2.11)$$

где интеграл численно равен площади под кривой распределения плотности отказов, расположенной слева от T . Если T_n выбрано правильно, вероятность безотказной работы вплоть до момента T_n близка к единице.

Возрастание вероятности отказа со временем эксплуатации элемента, характерное для износных явлений, не имеет места для вероятности внезапных отказов, которая от продолжительности эксплуатации не зависит и остается постоянной в период нормальной эксплуатации элемента. При необходимости оценить совместное влияние внезапных и износных отказов в течение времени работы следует определить суммарную вероятность отказа, которая за время t равна вероятности отказа как за счет износа, так и за счет случайной неисправности:

$$Q(t) = Q_n(t) + Q_v(t) - Q_v(t)Q_n(t). \quad (2.12)$$

Здесь индексы "в" и "и" указывают соответственно на внезапный и износный отказы.

$Q(t)$ является величиной, противоположной $P(t)$. Можно также определить полную вероятность безотказной работы (надежность) элемента для промежутка времени длительностью t от T до $T + \Delta t$ по выражению

$$P(t) = e^{-\lambda_n} \cdot \frac{P(T + \Delta t)}{P(t)}. \quad (2.13)$$

Общая надежность элемента может быть выражена также через общую опасность отказов. Если обозначить ее через $\lambda = \lambda_n + \lambda_v$, то можно записать

$$P(t) = e^{-\lambda_v} \cdot \frac{P(T + \Delta t)}{P(t)} \exp \left[- \int_t^{T+\Delta t} \lambda_v dt \right] \quad (2.14)$$

Для небольших отрезков времени либо при приближенных расчетах можно приближенно оценить надежность, подставляя среднearифметическое значение опасности износных отказов

$$\bar{\lambda}_v = 0,5[\lambda_v(t) + \lambda_v(T + \Delta t)], \quad (2.15)$$

и тогда общая надежность определяется как

$$P(t) = \exp[-(\lambda_v + \bar{\lambda}_v)t]. \quad (2.16)$$

Естественно, что при $m > M$ большее влияние будут оказывать отказы по старению, а при $m < M$ - внезапные отказы.

При последовательном (с точки зрения надежности) соединении элементов в системе надежность системы равна произведению полных надежностей всех элементов.

При расчете надежности отдельного элемента удобно вначале построить графики надежности по видам отказов, а затем - результирующую кривую надежности (рис. 2.4).

3. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

3.1. Надежность электрических машин

Вероятность безотказной работы электрической машины можно представить как произведение вероятностей безотказной работы ее отдельных узлов.

Выделим для рассмотрения основные части машины: обмотки, щеточный аппарат, подшипниковые узлы. Тогда

$$P = P_1 P_2 P_3, \quad (3.1)$$

где P_1, P_2, P_3 - вероятность безотказной работы соответственно обмоток, щеточного аппарата, подшипниковых узлов.

Значение P_1 может быть вычислено, если известны срок службы изоляции или опасность ее отказов.

Срок службы изоляции определяется в основном ее перегревом во время работы.

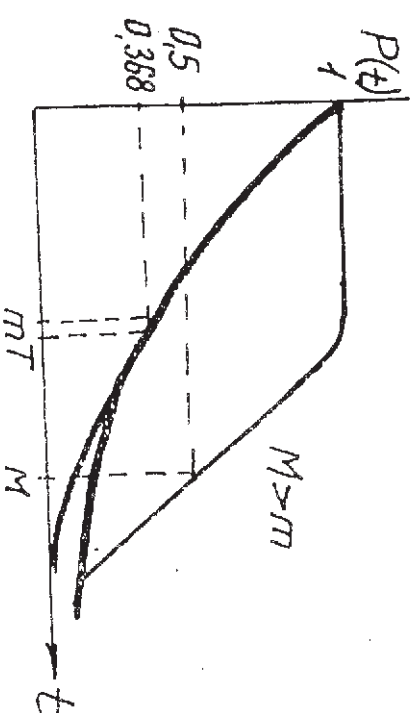
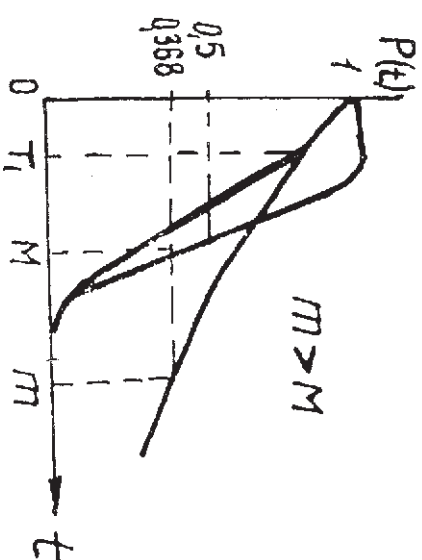


Рис. 2.4. График соотношения внезапных и износных отказов

$$t_x = t_0 \cdot \exp[-B/(273 + \Delta\theta_x)] = t_0 \cdot e^{-\alpha\Delta\theta_x}, \quad (3.2)$$

где t_0 - нормальный срок службы изоляции при температуре не выше допустимой классом изоляции (для промышленных машин принимается равным 100 000 ч);

$\Delta\theta_x$ - перегрев машины;

α - коэффициент, зависящий от класса изоляции (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Класс изоляции	Y	A	E	B	F	H	C
$\alpha, 1/^\circ\text{C}$	0,032	0,037	0,058	0,073	0,083	0,085	—
Допустимый перегрев	90	105	120	130	155	180	—
$\Delta\theta_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$							

Температура перегрева электрической машины зависит от ее мощности и температуры окружающей среды. В свою очередь коэффициент теплоотдачи от нагретых частей машины охлаждающему воздуху является функцией скорости последнего и может быть вычислен по выражению

$$\mu = \mu_0(1 + \eta\sqrt{V}), \quad (3.3)$$

где η – коэффициент, учитывающий степень участия поверхности двигателя в охлаждении ($\eta = 0,4 \dots 0,6$);

V – скорость воздуха, охлаждающего машину (может быть определена по производительности вентилятора);

μ_0 – коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/\text{см}^2\cdot\text{град}$) поверхности машины воздуху ($\mu_0 = 1,42 \cdot 10^{-3}$ для металлических поверхностей машины; $\mu_0 = 1,33 \cdot 10^{-3}$ для покрытых лаком поверхностей катушек, шин, якоря).

Потери мощности в электрической машине определяются расчетным путем [8], причем учитываются все виды потерь энергии. Значение мощности потерь определяет *приращение температуры обмотки электрической машины*, так как

$$\Delta\theta_x = \frac{P}{\mu \cdot S}, \quad (3.4)$$

где S – поверхность машины, охлаждаемая воздухом от вентилятора.

Подставив значение $P_{\text{пот}}$ и μ , получим *ожидаемый перегрев машины*:

$$\Delta\theta_x = \theta_x - \theta_{\text{всп}} = C_p \cdot P_{\text{пот}}, \quad (3.5)$$

откуда определится срок службы изоляции с учетом перегревов

$$t_x = t_0 \cdot e^{-q[\Delta\theta_x - \Delta\theta_{\text{норм}}]}, \quad (3.6)$$

и, следовательно,

$$\lambda_x = \lambda_0 \cdot e^{-q[C_p P_{\text{пот}} - \Delta\theta_{\text{норм}}]}. \quad (3.7)$$

Значение λ_0 соответствует выбранному сроку службы изоляции либо определяется из табл. 2.1.

Итак, вероятность P_1 определяется как

$$P_1 = \exp(-\lambda_1 t). \quad (3.8)$$

Вероятность безотказной работы щеточного аппарата определяется с учетом вибрации щетки на коллекторе машины и износа ее с нарушением контакта.

Если на поверхности коллектора или колец имеются неровности, могут возникнуть разрывы цепи тока вследствие отхода щеток. Если масса щетки совместно с приведенной к ней массой пружин щеткодержателя равна $m_{\text{ц}}$, то собственная частота колебаний щетки

$$\Phi_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C/m_{\text{ц}}}, \quad (3.9)$$

где C – жесткость пружин щеткодержателя.

Необходимо, чтобы частота воздействия на щетку определялась как

$$\Phi_x = \frac{Z}{T} = Z \cdot n, \quad (3.10)$$

где Z – число неровностей по окружности коллектора, которое может быть принято равным числу коллекторных пластин;

n – число оборотов в секунду;

не совпадала с собственной частотой колебаний щетки. Это условие должно соблюдаться при всем диапазоне рабочих скоростей машины от $n_{\text{мин}}$ до n_{max} и при допустимых пределах износа щетки, выражающегося в уменьшении ее массы ($\Delta m_{\text{ц}}$).

При износе щетки по высоте на Δh меняется усилие нажатия на щетку:

$$F_k = F_{\text{к0}} - C \cdot \Delta h. \quad (3.11)$$

Износ щетки связан с рядом других величин, характеризующих конструкцию и условия работы машины:

$$S_{\text{ц}} \Delta h = k P_{\text{max}} \cdot 2\pi R_x V^2 T \quad (3.12)$$

Здесь P_{max} – максимальное нажатие на щетку;

R_k – радиус коллектора или кольца;
 T – время работы, с;
 V – окружная скорость коллектора.

Здесь могут быть приняты постоянными все величины, кроме T , P и V . Тогда максимальный износ щетки определяется в основном произведением

$$PV_1^2 T_1 = PV_2^2 T_2 = \dots, \quad (3.13)$$

или, переходя к интенсивности отказов, можно записать:

$$\lambda_{2x} = \lambda_{20} \frac{P_x V_x^2}{P_0 V_0^2}. \quad (3.14)$$

Интенсивность отказа щетки λ_{20} может быть принята для тепловозных машин $5,5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Параметры P_0 и V_0 выбираются в зависимости от марки щеток (табл. 3.2). Тогда

$$P_2 = \exp(-\lambda_{2x} t). \quad (3.15)$$

Таблица 3.2

Щетки	Обозначение	Плотность тока, А/см	Окружная скорость, м/с	Удельное нагревание, г/см ²
Угольно-графитные	T2, T6	6	10	200...250
Графитные	T1 T3 611 M	7 10...11 10...11	12 25 40	200...250
Электрографитированные	3T2	10	45	200...250
	3T4	12	40	150...200
	3T8	10	40	200...400
	3T14	10...11	40	200...400
	3T71	10-12	40	200...250
	3T74	10...15	30	175...250
Медно-графитные	M1	15	25	
	M3	12	20	150...200
	M6	15	25	
	M20	12	20	

Вероятность P_3 определяется при выборе подшипника по коэффициенту работоспособности

$$C = Q(nh)^{0,3}, \quad (3.16)$$

где n – обороты вала, об/мин; h – время оборота узла.

Здесь

$$Q = Q_{\text{эвб}} K_0 K_K K_T, \quad (3.17)$$

$$\text{где } Q_{\text{эвб}} = \sqrt[3,33]{\alpha_1 \beta_1 Q_1^{3,33} + \alpha_2 \beta_2 Q_2^{3,33} + \dots} \quad (3.18)$$

(α_i – доля продолжительности работы с оборотами n_i ;

Q_i – нагрузка, соответствующая n_i ;

β_i – отношение чисел оборотов при соответствующем режиме к максимальному числу оборотов n_{max});

K_0 , K_K и K_T – коэффициенты безопасности, кинематический и температурный соответственно.

Выбранному по коэффициенту работоспособности подшипнику соответствует табличная интенсивность отказов λ_0 .

При изменении режимов работы

$$\lambda_x = \lambda_0 \sqrt[0,3]{\frac{Q_x n_x^{0,3}}{Q_0 n_0^{0,3}}}. \quad (3.19)$$

откуда ожидаемая вероятность безотказной работы

$$P_3 = \exp(-\lambda_{3x} t). \quad (3.20)$$

Общая для электрической машины вероятность безотказной работы определяется как

$$P = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t] = P_1 P_2 P_3. \quad (3.21)$$

3.2. Надежность электромеханических реле

Вероятность безотказной работы электромеханического реле определяется как произведение

$$P = P_K P_{\text{ог}}, \quad (3.22)$$

где $P_{кз}$, $P_{мс}$, $P_{об}$ – суммарная вероятность безотказной работы по внешним и параметрическим отказам соответственно контактов реле, механической части и обмотки реле.

Вероятность безотказной работы механической части

$$P_m = P_{мв} P_{мст} \quad (3.23)$$

($P_{мв}$ – надежность по внешним отказам; $P_{мст}$ – надежность параметрической).

Надежность по внешним отказам

$$P_{мв} = \exp[-(\lambda + \lambda' + \lambda_m \Phi) t], \quad (3.24)$$

где λ – интенсивность отказов контактов и обмотки реле; $\lambda = n\lambda_k + \lambda_{об}$ (n – число контактов); λ' – интенсивность отказов контактов и обмотки реле, определяемая переходными явлениями в процессе включения и выключения; $\lambda' = n\lambda'_k + \lambda'_{об}$; λ_m – интенсивность отказов механической части реле. Для тепловозных реле может быть принят $(0,01 \dots 1,0) \cdot 10^8$ 1/цикл, в зависимости от назначения реле.

Ориентировочные значения λ и λ' для различных типов реле приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Тип реле	λ	λ'
Электромагнитные малотокбартные	$(0,3 \dots 100) \cdot 10^{-6}$	$(0,03 \dots 0,08) \cdot 10^{-6}$
Электромагнитные нормального исполнения	$(0,1 \dots 80) \cdot 10^{-6}$	$(0,02 \dots 0,8) \cdot 10^{-6}$

Примечание. Значения λ и λ' – при нормальных условиях ($T = 20^\circ \text{C}$) и отсутствии ускорений.

Надежность работы реле в отношении параметрических отказов определяется по формулам:

$$P_{cp} = \frac{1}{\Delta_{cp} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^J e^{-\frac{(J-I_{cp})^2}{2\Delta_{cp}^2}} dJ, \quad (3.25)$$

при отпадании

$$P_{отп} = 1 - \frac{1}{\Delta_{отп} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^J e^{-\frac{(J-I_{отп})^2}{2\Delta_{отп}^2}} dJ. \quad (3.26)$$

Результатирующая параметрическая надежность реле

$$P_{мв} = P_{cp} \cdot P_{отп}. \quad (3.27)$$

Для каждого типа реле значения коэффициентов изменчивости $\frac{\Delta_{cp}}{J_{cp}}$ и $\frac{\Delta_{отп}}{J_{отп}}$ изменяются в относительно узких пределах (табл. 3.4).

и $\frac{\Delta_{отп}}{J_{отп}}$ изменяются в относительно узких пределах (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Реле	Коэффициент изменчивости, %	
	Δ_{cp} / J_{cp}	$\Delta_{отп} / J_{отп}$
Малотокбартные	5,0...8,0	14...16
Нормального исполнения	5,0...9,0	11...15

По значениям J_{cp} , $J_{отп}$ и коэффициенту изменчивости можно определить Δ_{cp} и $\Delta_{отп}$, необходимые для расчета надежности при срабатывании и отпадании. Значения величин J_r и J_o определяются при замкнутой и разомкнутой цепи катушки. Значения J_{cp} и $J_{отп}$ меняются в зависимости от внешних воздействий: температуры θ , влажности z , ускорений и вибраций a . Поправки на влияние внешних воздействий

$$\frac{\Delta J}{J} = f(\theta) = \frac{\Delta J / J}{\theta} \Delta \theta; \quad \frac{\Delta J}{J} = f(\theta) = \frac{\Delta J / J}{\theta} \Delta \theta \quad (3.28)$$

и т.д. могут быть приняты по табл. 3.5.

Результатирующие значения с учетом влияния различных факторов имеют вид:

$$J_{cp} = J_{cp} \sqrt{\sum_i^n (\Delta J / J)^2}; \quad (3.29)$$

$$J_{отп} = J_{отп} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta J / J)^2}. \quad (3.30)$$

Таблица 3.5

Реле	Выпадение, %				
	температуры на 1 °С		влажности на 1 %		ускорений на 1 м/с ²
	$A_{\text{ср}}$	$A_{\text{опт}}$	$A_{\text{ср}}$	$A_{\text{опт}}$	$A_{\text{ср}}$
Магнотабаритные	0,1...0,5	0,6...0,7	9·10 ²	5·10 ²	0,35...1,2
Нормального напряжения	0,3...0,7	0,9...1,1	9·10 ²	5·10 ²	1,5...2,5
Термисторизованные	0,1...0,2		—	—	0,9...1,2
					0,15...0,9

Следует учесть и изменения $\Delta_{\text{ср}}$ и $\Delta_{\text{опт}}$, которые при учете внешних воздействий составляют:

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{i,\text{ср}}^2}; \quad (3.31)$$

$$\Delta_{\text{опт}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_{i,\text{опт}}^2}; \quad (3.32)$$

а также изменения $J_{\text{ср}}$ и $J_{\text{опт}}$ в зависимости от времени работы и числа циклов срабатывания и отпадания N .

Изменения $\Delta J_{\text{ср}} / J_{\text{ср}}$ и $\Delta J_{\text{опт}} / J_{\text{опт}}$ от числа циклов обусловлены явлениями износов в местах контактов и в опорах; эти изменения подчиняются зависимостям:

$$\Delta J_{\text{ср}} / J_{\text{ср}} = k_1 \cdot N = k_1 f T; \quad (3.33)$$

$$\Delta J_{\text{опт}} / J_{\text{опт}} = k_2 \cdot N = k_2 f T. \quad (3.34)$$

Значения коэффициентов k_1 и k_2 принимаются равными:

$$k_1 = (0,005 \dots 0,003) \cdot 10^{-6},$$

$$k_2 = (0,01 \dots 0,05) \cdot 10^{-6}.$$

3.3. Надежность полупроводниковых приборов

Надежность по внезапным отказам при непрерывном режиме работы определяется выражением (1.2):

$$P = \exp(-\lambda t).$$

Значения λ при номинальном режиме ($\lambda = \lambda_0$), когда рассеиваемая прибором мощность $P = P_0$ и нормальных условиях работы ($\theta = 20^\circ \text{C}$) равны:

для германиевых диодов и триодов

$$\lambda_0 = (1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч},$$

для кремниевых диодов и триодов

$$\lambda_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

При других режимах и условиях работы значения определяются согласно зависимости

$$\lambda = \lambda_0 \exp(-\alpha(\theta_x - \theta_0)) + R \left[(U_{\text{рх}} J_{\text{рх}} k_1 + U_{\text{рх}} J_{\text{рх}} k_2) \right] + \gamma (U_{\text{рх}} - U_{\text{рх}0}), \quad (3.35)$$

где α — коэффициент, учитывающий температуру нагрева прибора (для германиевых приборов $\alpha = 0,02 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, для кремниевых — $\alpha = 0,01 \text{ 1/}^\circ\text{C}$);

γ — коэффициент, учитывающий приложенное к прибору напряжение ($U_{\text{рх}0}$ — номинальное, $U_{\text{рх}}$ — действительное; для германиевых приборов $\gamma = 1,25/U_{\text{рх}0}$, для кремниевых — $\gamma = 0,008/U_{\text{рх}0}$);

R — тепловое сопротивление прибора (принимается по его паспорту); ориентировочно для кремниевых приборов можно принять:

$$R = 60 = +(160 - 0,1 P_x), \quad (3.36)$$

Здесь P_x — мощность, выделяемая в приборе; для германиевых приборов

$$R = 30 = +(160 - 0,1 P_x); \quad (3.37)$$

k_1, k_2 — коэффициенты, характеризующие фактическое время работы прибора:

$$k_1 = t_1 / (t_1 + t_2); \quad (3.38)$$

$$k_2 = t_2 / (t_1 + t_2); \quad (3.39)$$

$U_{\text{рх}}$, $J_{\text{рх}}$ и $U_{\text{рх}0}$, $J_{\text{рх}0}$ — соответственно токи и напряжения под нагрузкой и при снятой нагрузке.

3.4. Надежность электрического аппарата, состоящего из нескольких сложных частей

При расчете надежности сложного аппарата (электропневматический контактор, реверсор и т.д.) он условно расчленяется на отдельные конструктивные части — узлы, при отказе которых выходит из строя весь аппарат. При этом учитываются только элементы, обычно выходящие из строя. Такими элементами являются: контактная система, дугогасительная камера, приводной механизм, электромагнитная и электропневматическая системы, изоляционные детали и т.д.

Сгруппируем и обозначим отказы по вызывающим их причинам:

- q_1 — повреждение электрической дугой;
- q_2 — повреждение током короткого замыкания;
- q_3 — перекрытие или пробой изоляции;
- q_4 — механические повреждения аппарата;
- q_5 — отказ контакта, обрыв цепи тока;
- q_6 — самопроизвольное срабатывание.

Для электромеханического аппарата с учетом введенных обозначений отказов может быть составлена структурная таблица их вероятностей, по которой можно судить о надежности рассматриваемого аппарата (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Узел	Группа отказа					
	1	2	3	4	5	6
Электропневматический контактор						
1. Контактная система	q_{11}	—	—	q_{41}	—	—
2. Дугогасительная камера	q_{12}	—	q_{32}	—	—	—
3. Тапа — изолятор	—	—	q_{33}	q_{43}	—	—
4. Стержень — изолятор	—	—	q_{34}	—	—	—
5. Пневматический привод	—	—	—	q_{45}	—	—
6. Электромагнитный деңгиль	—	—	—	q_{46}	q_{56}	—
Электромагнитное реле						
1. Электромагнитная система с катушкой	—	—	q_{31}	q_{41}	q_{51}	q_{61}
2. Контактная система	—	—	—	q_{42}	q_{52}	—

На основании табл. 3.6 составляется структурная формула для определения вероятности безотказной работы аппарата:

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^n P_y(t),$$

где $P_y(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$,

или

$$P_y(t) = 1 - \sum_{i=1}^n q_i + \left\{ (-1)^k \sum_{i=1}^m \left(\prod_{j=1}^m q_j q_2 \dots q_n \right) \right\}.$$

Здесь сумма произведений вероятностей отказа q_i определяет вероятность одновременного возникновения разного рода отказов. Практически в каждом узле одновременное возникновение нескольких видов отказов маловероятно, что существенно упрощает расчеты.

На основании данных табл. 3.6 можно получить, например, следующие структурные формулы:

для электропневматического контактора

$$P_a(t) = 1 - (q_{11} + q_{12}) - (q_{32} + q_{33} + q_{34}) - (q_{41} + q_{43} + q_{45} + q_{46}) - q_{56} + q_{11}q_{41} + q_{12}q_{32} + q_{33}q_{43} + q_{46}q_{56};$$

для электромагнитного реле

$$P_a(t) = 1 - q_{31} - (q_{41} + q_{42}) - (q_{51} + q_{52}) - q_{61} + q_{31}q_{41} + q_{31}q_{51} + q_{31}q_{61} + q_{41}q_{51} - q_{31}q_{41}q_{51} - q_{31}q_{41}q_{61} + q_{41}q_{51}q_{61} - q_{31}q_{41}q_{61} + q_{31}q_{41}q_{51}q_{61} + q_{42}q_{52};$$

Для простоты качественного анализа можно предположить, что в пределах одного аппарата вероятность отказов одной группы для разных узлов одинакова, а вероятности одновременного возникновения двух и более отказов равны. При этом возникновением одновременно четырех отказов можно пренебречь, так как вероятность такого события бесконечно мала. В этом случае структурные формулы приобретают вид:

для электропневматического контактора

$$P_a(t) = 1 - 2q_1 - 3q_3 - 4q_4 - q_5 + 4q_2;$$

для электромагнитного реле

$$P_a(t) = 1 - q_3 - 2q_4 - 2q_5 - q_6 + 7q_2$$

(q_2 – вероятность возникновения двух отказов одновременно).

Структурная формула дает возможность производить сравнительную оценку надежности вариантов конструкций аппаратов: как качественную, так и количественную. Кроме того, по ней можно определить основные направления исследований и мероприятий по повышению надежности.

По полученному выражению для $P_a(t)$ определяется интенсивность отказов λ и среднее время безотказной работы T_{cp} , что дает возможность вычислить для заданной вероятности безотказной работы ожидаемую наработку аппарата:

$$t = T_{cp} [1 - P_a(t)].$$

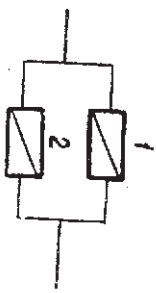


Рис. 2.5. Схема дублирования элемента

Параметрическая надежность определяется графоаналитическим методом: построением закона распределения случайной величины (времени работы до отказа) и нанесением на полученный график выбранной зоны допуска.

Если система имеет резервирование (рис. 2.5), то одновременный отказ первого и второго элементов возможен с вероятностью

$$q_1(t)q_2(t) = [1 - P_1(t)][1 - P_2(t)].$$

Вероятность безотказной работы такой системы $P(t)$ при равных вероятностях отказов элементов ($q_1 = q_2 = q$) будет определена как

$$P(t) = 1 - (1 - P)^2.$$

При n включенных параллельно элементах

$$P(t) = 1 - (1 - P)^n.$$

Так, при $P_1 = 0,5$ $P(t) = 0,75$, в чем легко убедиться.

3.5. Определение интенсивности отказов элементов в зависимости от уровня нагрузки

При рассмотрении законов распределения отказов было выяснено, что интенсивности отказов элементов могут быть либо постоянными, либо меняться в зависимости от времени эксплуатации. Для систем длительного использования, к которым относятся все транспортные системы, предусматривается профилактическое обслуживание, что практически (при качественном его проведении) исключает влияние износных отказов. Поэтому возникают, как правило, только внезапные отказы.

Это в значительной мере упрощает расчет надежности. Однако сложные системы состоят из множества элементов, соединенных различными способами. Когда система находится в эксплуатации, некоторые ее элементы работают непрерывно, другие – только в определенные промежутки времени, третьи выполняют лишь короткие операции включения или выключения. Следовательно, в течение заданного промежутка времени лишь у части элементов время работы совпадает со временем работы системы, другие элементы работают более короткое время.

В этом случае для расчета наработки заданной системы рассматривается только время, в течение которого элемент включен; такой подход возможен, если допустить, что в течение периодов, когда элементы не включены в работу системы, интенсивности их отказов равны нулю.

С точки зрения надежности, наиболее распространенная схема последовательного соединения элементов. В этом случае при расчете используется правило произведения вероятностей:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где $P_i(t)$ – надежность i -го элемента, который включается на t_i часов из общего времени работы системы t .

Для расчетов может быть использован так называемый коэффициент занятости d_i , равный t_i / t , т.е. отношению времени работы элемента ко времени работы системы. Практический смысл этого коэффициента состоит в том, что для элемента с известной интенсивностью отказов λ_i интенсивность отказов в системе с учетом времени работы будет равна $\lambda = d_i \lambda_i$.

Такой же подход может быть использован по отношению к отдельным узлам системы.

Другим фактором, который следует учитывать при анализе надежности системы, является уровень рабочей нагрузки, с которой элементы работают в системе: по причине того, что он в значительной мере определяет

величину ожидаемой интенсивности отказов. Причем эта интенсивность существенно меняется даже при небольших изменениях рабочей нагрузки, воздействующей на элемент.

Основное затруднение при расчетах, учитывающих уровень нагрузки, вызывается многообразием факторов, определяющих как понятие *прочности элемента*, так и понятие *нагрузки*.

Прочность элемента объединяет его сопротивление механическим нагрузкам, вибрациям, давлению, ускорению и т.п. К категории прочности относятся также сопротивление тепловым нагрузкам, электрическая прочность, влагостойкость, коррозионная стойкость и ряд других свойств. Поэтому прочность не может быть выражена некоторой числовой величиной и не существует единиц измерения прочности, учитывающих все эти факторы. Поэтому для оценки прочности и нагрузки используют статистические методы, с помощью которых определяется наблюдаемый эффект от отказа элемента во времени под действием ряда нагрузок или под действием преимущественной нагрузки.

Элементы проектируются так, чтобы они могли выдерживать номинальные нагрузки. При эксплуатации элементов в условиях номинальных нагрузок наблюдается определенная закономерность значений интенсивности их внезапных отказов. Эта интенсивность называется *номинальной интенсивностью внезапных отказов* элементов. Она является исходной величиной для определения действительной интенсивности внезапных отказов реального элемента (с учетом времени работы и рабочей нагрузки).

Из всего многообразия нагрузок, действующих на элемент или на систему, необходимо выбрать те, которые наиболее существенно влияют на надежность. При этом — особенно при решении задач прогноза надежности — необходимо до выполнения непосредственных расчетов произвести так называемое *априорное ранжирование* факторов влияния. Методика выполнения этой операции в последние годы довольно хорошо разработана и лежит в сфере интересов теории планирования эксперимента [6]. Сущность априорного ранжирования в следующем: разным специалистам предлагается расположить факторы, действующие на объект исследования (или внутри объекта), в порядке убывания вносимого ими вклада или влияния на определенный критерий состояния. То есть необходимо проанализировать n потенциально возможных факторов, присвоив им порядковые номера (ранги): 1, 2, ..., n . С этой целью составляется матрица рангов и — по ее результатам — вычисляется *коэффициент конкордации* (согласования) W , определяющий степень согласованности мнений специалистов:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где S — сумма квадратов отклонений;
 m — число опрошенных специалистов;
 n — число факторов.

$$S = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m (a_{ij} - L))^2,$$

где a_{ij} — ранг (порядковый номер при определении) i -го элемента у j -го специалиста;

L — среднее значение сумм рангов по каждому фактору;

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}}{n}.$$

Если специалист затрудняется провести четкую грань между двумя факторами, то вводится "связанные" ранги, т.е. двум или более факторам присваивается одно и то же место.

Тогда

$$W = \frac{S}{1/12m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

где

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m (t_i^3 - t_i).$$

Здесь $t_j - j$ — число одинаковых рангов в i -ом ранжировании.

Если у некоторых специалистов не оказалось "связанных" рангов, то для них $T_j = 0$.

Значения коэффициента конкордации лежат в пределах от нуля до единицы. Чем больше значение, тем выше согласованность мнений у специалистов.

Для реального элемента или системы в настоящее время учитываются три основные группы факторов воздействий, окружающей среды: *механические, тепловые и рабочие нагрузки*.

Влияние механических воздействий учитывается коэффициентом K_d , величина которого определяется местом установки аппаратуры и может быть принята равной:

для лабораторий и благоустроенных помещений — 1;
 для стационарных наземных установок — 10;

Номинальная интенсивность внезапных отказов, выбранная по табл. 2.1, должна быть увеличена в K_2 раз в зависимости от места установки аппарата в эксплуатации.

Кривые, приведенные на рис. 2.6, иллюстрируют общий характер изменения интенсивности внезапных отказов электрических и электронных элементов в зависимости от температуры нагрева и величины рабочей нагрузки.

Интенсивность внезапных отказов с увеличением рабочей нагрузки, как видно из приведенных кривых, возрастает по логарифмическому закону. Из этих кривых также видно, каким образом можно уменьшить интенсивность внезапных отказов элементов даже до величины, меньшей номинального значения. Существенное сокращение интенсивности внезапных отказов достигается в том случае, если элементы работают при нагрузках ниже номинальных значений.

Рис. 2.6 может быть использован при проведении ориентировочных (учебных) расчетов надежности любых электрических и электронных элементов. Номинальному режиму в этом случае соответствуют температура 80 °С и 100% рабочей нагрузки.

Если расчетные параметры элемента отличаются от номинальных значений, то по кривым рис. 2.6 может быть определено увеличение λ для выбранных параметров и получено отношение λ_p / λ_0 , на которое и умножится величина интенсивности отказов рассматриваемого элемента.

Высокая надежность может быть заложена при проектировании элементов и систем. Для этого необходимо стремиться к уменьшению температуры элементов при работе и применять элементы с повышенными номинальными параметрами, что относительно снижению нагрузки. Увеличение стоимости изделия в любом случае окупается за счет сокращения эксплуатационных расходов.

Интенсивность отказов для элементов электрических цепей в зависимости от нагрузки может быть определена также по эмпирическим формулам. В частности, в зависимости от рабочего напряжения и температуры

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{U_1}{U_2} \cdot K \cdot (t_2 - t_1),$$

где λ_1 — табличное значение интенсивности отказов при номинальном напряжении U_1 и температуре t_1 ;

λ_2 — значение интенсивности отказов при рабочем напряжении U_2 и температуре t_2 .

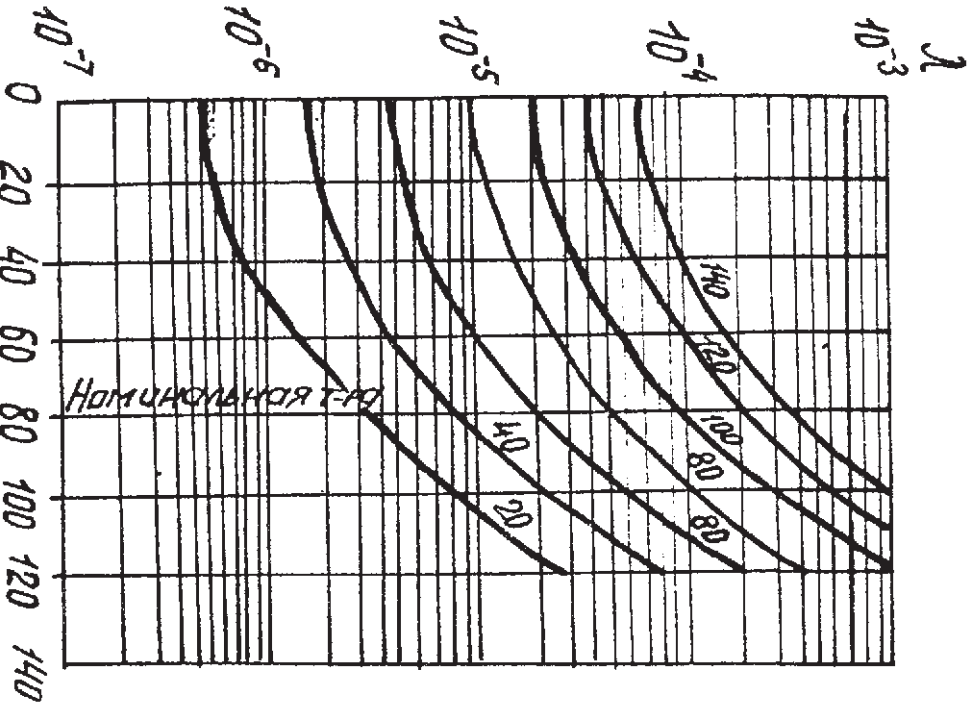


Рис. 2.6. Зависимость интенсивности отказов от нагрузки

Предполагается, что механические воздействия остаются на прежнем уровне. В зависимости от вида и типа элементов значение n меняется от 4 до 10, а значение K лежит в пределах 1,02...1,15.

При определении реальной интенсивности отказов элементов необходимо представлять величину ожидаемых уровней нагрузок, при которых элементы будут работать, и лишь затем производить расчет величин элек-

трических и тепловых параметров с учетом переходных режимов. Правильное выявление нагрузок, воздействующих на отдельные элементы, приводит к значительному повышению точности расчета надежности.

При расчете надежности с учетом износосовых отказов необходимо также учитывать реальные эксплуатационные условия. Значения долговечности M_0 , приведенное в табл. 2.1, так же, как и значения λ_0 относятся к номинальному режиму нагрузки и лабораторным условиям работы. Все элементы, работающие в других условиях, имеют долговечность, равную номинальной, умноженную на некий коэффициент влияния K_n . Величина K_n может быть принята равной:

для лабораторий $-1,0$;
для наземных установок $-0,3$;
для железнодорожного подвижного состава $-0,17$.

Небольшие колебания данного коэффициента возможны для аппаратуры различного назначения.

Для определения ожидаемой долговечности $M_{ож}$ элемента необходимо среднюю (номинальную) долговечность M_0 , определенную по табл. 2.1 для этого элемента, умножить на коэффициент K_n .

При отсутствии статистических материалов, необходимых для определения интенсивности отказов в зависимости от уровня нагрузки, может быть использован коэффициентный метод расчета интенсивности отказов. Сущность этого метода сводится к тому, что при расчете критериев надежности аппаратуры используются коэффициенты, связывающие интенсивность отказов элементов различных типов и интенсивность отказов элемента, для которого имеются достоверные характеристики надежности в данных условиях.

При этом предполагается, что справедливы экспоненциальный закон надежности, а интенсивности отказов элементов всех типов изменяются в зависимости от условий эксплуатации в одинаковой степени. Последнее допущение означает, что при различных условиях эксплуатации справедливо соотношение

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_0} = K_i = \text{const},$$

где λ_0 — интенсивность отказов элемента, количественные характеристики которого известны;

λ_i — интенсивность отказа i -го элемента (или типа элементов);

K_i — коэффициент надежности i -го элемента (или типа элементов).

Элемент с интенсивностью отказов λ_0 называется основным элементом расчета системы. При вычислении коэффициентов K_i за основной элемент расчета системы принимается проводящее нерегулируемое сопротивление.

В данном случае для расчета надежности системы не требуется знание интенсивности отказов всех типов элементов. Достаточно лишь знать коэффициенты надежности K_i , число элементов в схеме и интенсивность отказов основного элемента расчета λ_0 . Так как K_i имеет разброс значений, то надежность определяется, как правило, не для всех его значений, а лишь для граничных K_{min} и K_{max} .

Значения коэффициента надежности, определенные на основании многолетнего анализа данных по интенсивности отказов различной электроаппаратуры тепловозов, приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Элементы	K _i		Элементы	K _i	
	min	max		min	max
Электровакуумные приборы	18,3	26,6	Электродвигатели	17,0	22,0
Сопротивления	1,0	1,0	Полупроводниковые диоды	11,7	15,4
Конденсаторы	0,33	0,61	Транзисторы	12,5	16,2
Трансформаторы	1,3	3,0	Штепсельные разъемы	10,7	15,3
Дроссели, катушки индуктивности	1,0	2,0	Регулируемые сопротивления	7,2	12,0
Реле электромагнитные	1,0	2,0	Сенсорные выпрямители	16,0	20,0

Интенсивность отказов основного элемента расчета (в данном случае сопротивления) следует определять как "средневзвешенное" значение интенсивностей отказов сопротивлений, применяемых в проектируемой системе, т.е.

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i N_i}{m},$$

где λ_i и N_i — интенсивность отказов и количество сопротивлений i -го типа и номинала;

m — число типов и номиналов сопротивлений.

Построение результирующей зависимости надежности системы от времени эксплуатации желательно проводить как для значений K , так и для значений K_{max} .

Располагая сведениями о надежности отдельных элементов, входящих в систему, можно дать общую оценку надежности системы и определить блоки и узлы, требующие дальнейшей доработки. Для этого иссле- дуемая система разбивается на узлы по конструктивному или смысловому признаку (сооставляется структурная схема). У каждого выбранного узла определяется надежность. Узлы, имеющие меньшую надежность, требуют доработки и усовершенствования в первую очередь.

При сравнении надежности узлов — а тем более различных вариантов систем — следует помнить, что абсолютная величина надежности не отра- жает поведения системы в эксплуатации и ее эффективности. Она и та же величина надежности системы может быть достигнута в одном случае за счет основных элементов, ремонт и смена которых требует значительного времени и больших материальных затрат и отказ которых требует отстра- нение локомотива или мотор-вагонного поезда от работы, а в другом слу- чае — за счет "мелких" элементов, смена которых производится обслужи- вающим персоналом без отстранения машины от работы. Поэтому для сравнительного анализа проектируемых систем рекомендуется сопостав- лять надежности элементов, аналогичных по своему значению и последст- виям, возникающим в результате их отказов.

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ

Меры, выполнение которых обеспечивает надежную работу любого устройства (в том числе и локомотива), весьма разнообразны, но могут быть сведены в несколько больших групп.

4.1. Обеспечение надежности при проектировании

Не вдаваясь в особенности проектировочных расчетов на надеж- ность, которые входят в разделы учебных дисциплин, можно выде- лить некоторые общие способы, позволяющие достигать требуемого уровня надежности:

- 1) качество проектирования;
- 2) максимальное применение в конструкции унифицированных узлов и деталей;
- 3) широкое применение "гостированных" деталей, изготавливаемых специализированными предприятиями;
- 4) улучшение конструктивных решений;

- 5) принятие "широких" допусков на взаимозаменяемые узлы и дета- ли;
- 6) внедрение принципов "равнонадежности" и "кратной надежности";
- 7) обязательный учет сроков работы машины, условий работы и ре- жимов нагрузки и предоставления потребителю информации об объемах и сроках профилактических работ;
- 8) обеспечение возможности испытания, настройки и доводки при высокой ремонтопригодности.

4.2. Обеспечение надежности при изготовлении или ремонте

Эти мероприятия можно разделить на две группы: *организационные* и *технологические*.

К первым относятся:

- 1) ритмичность работы предприятия-изготовителя или ремонтного;
- 2) наличие организованного в просторстве и времени процесса ре- монта или изготовления (потоковые линии, сетевые графики, компьютер- ный контроль технологического процесса и т.п.);
- 3) высокая квалификация работников предприятия;
- 4) непрерывный контроль качества узлов и машины в целом;
- 5) проведение испытаний (обкатки).

Ко вторым относятся:

- 1) высокий уровень автоматизации и механизации производства;
- 2) использование качественного специализированного инструмента и приспособлений;
- 3) работа по обоснованным нормам и расценкам;
- 4) использование только оговоренных в проекте материалов;
- 5) строгое выполнение разработанных технологий изготовления, транспортировки и хранения изделий.

4.3. Обеспечение надежности в эксплуатации

Современные взгляды на надежность сложных систем рассматрива- ют создание, эксплуатацию и ремонт технического устройства (ТУ) как единый цикл. При этом основным "потребительским" критерием надеж- сти является, безусловно, так называемая "эксплуатационная надежность", то есть вероятность безотказной работы ТУ в процессе эксплуатации. Для поездных локомотивов и МВПС под "безотказной работой" понимается от- сутствие нарушений безопасности движения, то есть крушений, аварий, особых случаев брака в работе. Их перечень имеется в Приказе МПС РФ

№ 11 от 08.01.94 "О мерах по обеспечению безопасности движения на железнодорожном транспорте".

Приведем выдержку из Приказа № 11.

2. К *крупным* поездов относятся:

столкновения пассажирских или грузовых поездов с другими поездами или подвижным составом, сходы подвижного состава в пассажирских или грузовых поездах на перегонах и станциях, в результате которых погибли или получили тяжкие телесные повреждения люди или повреждены локомотивы или вагоны до степени исключения их из инвентаря.

3. К *авариям* относятся:

3.1) столкновения пассажирских поездов с другими поездами или подвижным составом, сходы подвижного состава в пассажирских поездах на перегонах и станциях, не имеющие последствий, указанных в п. 2, но в результате которых повреждены локомотивы или вагоны в объеме ТР-2 и дефовского или более сложных ремонтов;

3.2) столкновения грузовых поездов с другими грузовыми поездами или подвижным составом, сходы подвижного состава в грузовых поездах на перегонах и станциях, не имеющие последствий, указанных в п. 2, но в результате которых допущено повреждение локомотивов или вагонов в объеме капитального ремонта;

3.3) столкновения и сходы подвижного состава при маневрах, экипировке и других передвижениях, в результате которых погибли или получили тяжкие телесные повреждения люди или повреждены локомотивы или вагоны до степени исключения их из инвентаря.

4. К *особым случаям брака* в работе относятся:

столкновения пассажирских или грузовых поездов с другими поездами или подвижным составом, сходы подвижного состава в пассажирских или грузовых поездах на перегонах и станциях, не имеющие последствий, указанных в п. 2 и 3;

уход подвижного состава на маршрут присема, отправления поезда или на перегон;

излом оси, осевой шейки или колеса;

обрыв хребтовой балки подвижного состава;

порча локомотива с требованием вспомогательного локомотива в пассажирском поезде;

столкновение поезда с автотранспортным средством или другой самоходной машиной, полученное по вине железнодорожников...

5. К *случаям брака в работе* относятся:

саморасцеп автоцепов в поезде;

неисправность устройств АДСН на локомотиве в пути следования, в результате которой затребован вспомогательный локомотив;

обрыв автоцепов подвижного состава;

падение на путь деталей подвижного состава;

неисправности ... подвижного состава ..., в результате которых произошла задержка поезда на перегоне хотя бы по одному из путей или на станции сверх времени, установленного графиком движения, на один час и более;

сходы подвижного состава при маневрах, экипировке и других передвижениях, не имеющие последствий, указанных в п. 3.3;

столкновения подвижного состава при маневрах, экипировке и других передвижениях, не имеющие последствий, указанных в п. 3.3, но при которых повреждены локомотивы в объеме ремонта ТР-1 ... или более сложных ремонтов подвижного состава.

Таким образом, эксплуатационные ошибки или низкая эксплуатационная вероятность безотказной работы могут привести к тяжелым последствиям.

Анализируя нарушения безопасности движения с точки зрения надежности ТПС, можно сделать вывод, что к наиболее тяжелым последствиям могут привести отказы экипажной части, тормозного оборудования, устройств контроля работоспособности машиниста и электрических цепей управления, причем для первых наиболее характерны внезапные отказы, а для остальных параметрические. Поэтому особый интерес представляет определение параметрической надежности тормозного оборудования.

К методам, позволяющим эксплуатационную надежность, можно отнести:

1) научные методы эксплуатации;

2) постоянный учет предложений, возникающих в результате длительной эксплуатации поездных и маневровых машин, а также МВПС на конкретном полигоне;

3) подбор высококвалифицированных кадров эксплуатационников и в первую очередь локомотивных бригад;

4) обобщение опыта эксплуатации;

5) связь с ремонтными предприятиями и заводами-изготовителями;

6) сбор и обработка статистических материалов;

7) применение методов диагностики.

Анализ отказов по локомотивам конкретизирует влияние перечисленных факторов:

40 ... 45% отказов объясняются ошибками проектов;

20% — ошибками изготовления;

30% — ошибки эксплуатации и ремонта

5...10% — износом и старением.

Следовательно, наибольший "вклад" в надежность локомотивов вносят проектировщики, эксплуатационники и ремонтники.

Список литературы

1. Вентуль Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
2. Галкин В.Г. и др. Надежность тягового подвижного состава: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
3. Гнездило Б.Н. и др. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнездило, Ю.К. Белиев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
4. Голынкин Т.А. Прикладная теория надежности: Учебник для вузов по специальности "АСУ". – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 168 с.
5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 37 с.
6. Грачев Ю.П. Математические методы планирования эксперимента. – М.: Пишваев промышленность, 1979. – 200 с.
7. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 406 с.
8. Исаев И.П. и др. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности электрооборудования локомотивов / И.П. Исаев, А.М. Матвеевичев, Л.Г. Козлов. – М.: Транспорт, 1984. – 244 с.
9. Моисеев Г.А. Секционная мощность тепловозов и проблемы надежности. Межиздательская сер. "Надежность и качество". – М.: Транспорт, 1978. – 112 с.
10. Порядок разработки и оценки результативности мероприятий по повышению надежности тепловозов: Проект ОСТ РФ. – М., МПС РФ, 1996.
11. Решетов Д.Н. и др. Надежность машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; Под ред. проф. Д.Н. Решетова. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
12. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / В.В. Сапожников, В.В. Сапожников, В.И. Талалаев и др.; Под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 288 с.
13. Смирнов Н.В., Дулин-Борковский И.В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. – 3-е изд. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
14. Стрекошова В.В. Тепловозы с передачами переменного тока. Учебное пособие. – Л.: ЛПИИЖТ, 1972. – 49 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основы теории надежности.....	3
1.1. Термины теории надежности.....	6
1.2. Критерии надежности.....	12
1.3. Экспериментальная оценка надежности.....	15
1.4. Показатели ремонтопригодности.....	19
2. Расчет надежности узлов и систем локомотивов.....	23
2.1. Расчет надежности с учетом внезапных отказов.....	28
2.2. Расчет надежности с учетом старения элементов.....	33
3. Расчет надежности элементов систем.....	36
3.1. Надежность электрических машин.....	38
3.2. Надежность электромагнитных реле.....	41
3.3. Надежность полупроводниковых приборов.....	48
3.4. Надежность электрического аппарата, состоящего из нескольких сложных частей.....	49
3.5. Определение интенсивности отказов элементов в зависимости от уровня нагрузки.....	52
4. Обеспечение надежности локомотивов.....	52
4.1. Обеспечение надежности при проектировании.....	52
4.2. Обеспечение надежности при изготовлении или ремонте.....	52
4.3. Обеспечение надежности в эксплуатации.....	52

Список литературы.....

СТРЕКОШИТОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ
ИСАЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВОВ

Учебное пособие

Редактор *А.И. Жуков*
Технический редактор *М.С. Саагмиева*
Корректор *Н.А. Тимачева*
Компьютерная верстка *Г.П. Федорова*
План 1998 г., № 150
Лицензия ЛР 020974 от 28.03.95 г.

Подписано в печать с оригинала-макета 18.11.99.
Формат 60×84 1/16. Бумага для множ. апп. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,375. Уч.-изд. л. 3,375. Тираж 300.
Заказ *4022*. Цена 21 р.
Петербургский государственный университет путей сообщения.
190031, СПб, Московский пр., 9.
Типография ПГУПС. 190031, СПб, Московский пр., 9.