

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

В.Е.Воробьев, В.Я.Кучер

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
МАШИН**

ПИСЬМЕННЫЕ ЛЕКЦИИ

Санкт-Петербург
2004

Утверждено редакционно–издательским советом университета

УДК 621.313–192 075.8

Воробьёв В.Е., Кучер В.Я. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56с.

Письменные лекции разработаны в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 654500 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (специальность 180100 – «Электромеханика»).

В письменных лекциях рассматриваются методы прогнозирования, математического моделирования и испытаний электрических машин на надёжность.

Изложенный материал предназначен для студентов пятого курса, изучающих дисциплину «Прогнозирование срока службы электрических машин».

Рассмотрено на заседании кафедры электротехники и электромеханики протокол № 11 от 1 июля 2004г., одобрено методической комиссией энергетического факультета протокол № 1 от 3 сентября 2004г.

Рецензенты: кафедра электротехники и электромеханики СЗТУ (зав. каф. В.И.Рябуха, канд. техн. наук, проф.); Г.Я.Скориков, канд. техн. наук, зав. отделом образования Красносельского района г. Санкт-Петербурга

©Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2004

© Воробьёв В.Е., 2004

© Кучер В.Я., 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Надёжность – один из основных показателей качества любого технического устройства. Поэтому специалист в области электромеханики должен уметь оценивать качество электрической машины на любом отрезке её «жизни» – от этапа проектирования до непосредственного применения по назначению, т.е. в период эксплуатации.

В связи с этим целью курса является изучение электрических машин как объектов оценки показателей надёжности, методов аналитического и экспериментального определения последних.

В результате изучения курса будущий специалист должен знать современные методы определения надёжности электрических машин и уметь применять их на практике, иметь представление о перспективных направлениях развития данной области знаний.

Теоретической базой курса являются специальные разделы высшей математики (теория вероятности и математическая статистика), курс электрических машин, технология производства электрических машин и их испытания.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность электрической машины – свойство машины выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надёжность является *комплексным свойством*, которое в зависимости от назначения машины и условий её эксплуатации может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Срок службы – это показатель долговечности, а его прогнозирование сводится к расчёту надёжности электрической машины (аналитическое прогнозирование).

При расчёте надёжности разрабатывается структурная схема надёжности электрической машины, выявляются основные эксплуатационные факторы, влияющие на надёжность, и оценивают их количественно. В структурную схему входят основные узлы машины, подверженные отказам. Так, для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором такими узлами являются обмотка статора и подшипниковый узел, а в случае фазного ротора, кроме того, обмотка ротора и узел контактных колец. Для машин постоянного тока – обмотки: якоря, возбуждения, добавочных полюсов, компенсационная; щёточно-коллекторный и подшипниковый узлы. Для синхронных машин – обмотки статора и возбуждения, узлы контактных колец и подшипниковые узлы. Если вероятность безотказной работы отдельных узлов близка к единице, то эти узлы не учитывают в структурной схеме при расчёте надёжности электрической машины.

Анализ причин отказов [1] электрических машин различных типов даёт следующую информацию о распределении отказов между отдельными узлами.

Асинхронные двигатели. В большинстве случаев (85 – 95%) отказы асинхронных двигателей мощностью свыше 5 кВт происходят из-за повреждения обмоток и распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93%, пробой межфазной изоляции – 5%, пробой пазовой изоляции – 2%. На подшипниковый узел приходится 5 – 8% отказов и небольшой процент связан с такими причинами, как распайка выводных концов, скручивание валов, разрыв стержней ротора и др.

Синхронные машины. У машин этого типа наиболее «слабым» узлом с точки зрения надёжности является статор. При этом на изоляцию обмотки статора приходится 2,26% отказов (ТГ) и 3,67% (ГГ), на места пайки – 0,34 и 0,92%, на повреждение активной стали статора – 0,15 и 0,64% соответственно.

Машины постоянного тока. Наибольшая доля отказов в этих машинах приходится на коллекторно-щёточный и подшипниковый узлы. Согласно эксплуатационной статистике в среднем около 25% отказов машин происходит из-за неисправности коллекторов. Другой серьёзной причиной является возникновение кругового огня. Доля отказов по этой причине равна 70%.

1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1.1. Методы прогнозирования надёжности: их классификация и общая характеристика

В настоящее время в различных областях науки и техники существует достаточно много методов прогнозирования показателей надёжности, отличающихся совокупностью решаемых задач и особенностями применяемого математического аппарата.

По объёму информации, используемой при прогнозе, эти методы можно разделить на три группы:

- методы экспертных оценок, применяемые в тех случаях, когда отсутствует достоверная информация об объекте и данные об изменениях его состояния за время эксплуатации;
- методы, основанные на экстраполяции и используемые в тех случаях, когда имеются достаточно полные данные, но неизвестны общие закономерности изменения состояния объекта за время эксплуатации;
- методы моделирования, используемые при наличии достаточного объёма статистических данных об изменении состояния однотипных объектов в процессе эксплуатации.

В настоящее время наибольшее распространение при прогнозировании технического состояния объектов получили методы второй группы.

Основой для прогнозирования технического состояния в этих методах является аналитическое прогнозирование, при котором по многомерному вектору состояний $S(s_1, s_2, \dots, s_n)$ или диагностических сигналов $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$, определённых или измеренных в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k$, необходимо определить их значения в последующие моменты времени $t_j (j = k + 1, \dots, k + l)$.

Аналитическое прогнозирование состояния технических объектов основывается на объективном существовании определённой тенденции в изменении параметров их состояния или диагностических сигналов при эксплуатации, основные закономерности которой могут быть охарактеризованы некоторой временной функцией. При этом полагают, что эта зависимость, называемая трендом (trend, англ. – тенденция), выражающая усреднённую во времени для определённого периода наблюдения тенденцию, может быть экстраполирована на последующие периоды времени.

Таким образом, задача прогнозирования технического состояния объекта аналитическими методами состоит в получении массива ретроспективных значений прогнозируемого параметра $X(t_i)$, его анализе и выделении тренда в виде аппроксимирующей временной функции, определении прогнозируемой величины параметра $X(t_j)$ и оценке точности прогноза.

Нахождение функции регрессии $f(t) = x(t)$, аппроксимирующей характер изменения параметра (процесса) во времени, играет важную роль в задаче

прогнозирования, так как определяет по существу результаты экстраполяции тренда.

Для выбора вида аппроксимирующей функции используются различные методы, в частности метод последовательных разностей, определяющий степень аппроксимирующего полинома; а также – критериальные методы, основанные на оценке критерия близости фактической кривой к расчётной.

1.2. Принципы математического моделирования надёжности, аналитическое прогнозирование

При разработке методики расчёта надёжности электрической машины одним из важных этапов является создание математической модели надёжности для каждого узла, входящего в структурную схему. Отказы – случайные события, поэтому для построения математической модели надёжности используется аппарат теории вероятности и математической статистики.

При создании модели необходимо из большого количества параметров, характеризующих электрическую машину, выбрать основные, влияющие на надёжность; второстепенные параметры должны быть отброшены. Определяют факторы и элементы, которые следует учитывать при построении модели. Составляют формализованную схему. Преобразование этой схемы в математическую модель выполняют математическими методами.

При составлении математической модели надёжности электрической машины можно считать изделием всю электрическую машину. В этом случае модель получается довольно сложной. Можно пойти по другому пути и считать изделием каждый узел в структурной схеме надёжности (межвитковую изоляцию, корпусную и межфазную изоляцию, подшипниковые узлы и т.п.). Тогда для каждого узла разрабатывается математическая модель и на её основе методика расчёта надёжности узла. Рассчитав надёжность основных узлов и зная по структурной схеме, как (параллельно или последовательно с точки зрения надёжности) соединены эти узлы между собой, можно рассчитать надёжность электрической машины.

У наиболее распространённых электрических машин, асинхронных двигателей, наименее надёжны обмотки. Отказы обмоток составляют 95 – 98% от общего количества отказов, поэтому рассмотрим математические модели наименее надёжного узла двигателей со всыпной обмоткой.

Для примера рассмотрим две математические модели надёжности обмоток асинхронных двигателей [2]. Обе они основаны на известной в теории надёжности модели прочности. Однако в качестве параметра, характеризующего электрическую прочность изоляции, в первой модели принято пробивное напряжение, а во второй – дефектность. Под *дефектностью* понимается число дефектов на единице длины, а *дефектом* считается сквозное повреждение изоляции, пробивное напряжение которой не выше

напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка, имеющего длину, равную толщине изоляции. Обмотку асинхронного двигателя можно представить как изделие, состоящее из ряда элементов. Такими элементами являются межвитковая, корпусная и межфазная изоляции. Среди этих элементов всыпной обмотки отказы распределяются следующим образом: межвитковые замыкания – 93%, корпусная изоляция – 2%, межфазная изоляция – 5%.

Элементами межвитковой изоляции *первой математической модели* считают два проводника, расположенные рядом в пазу или лобовой части обмотки и разделённые межвитковой изоляцией. Для успешной работы межвитковой изоляции обмотки необходима исправность всех входящих в неё элементов, так как пробой изоляции между парой соседних проводников приводит к отказу всей обмотки. Естественным считать, что элементы отказывают независимо друг от друга. Элементы можно считать одинаковыми. Пробивное напряжение всех пар соседних проводников подчиняется фиксированному распределению вероятностей. Отказ происходит тогда, когда напряжение, приложенное к соседним проводникам, превышает пробивное напряжение межвитковой изоляции в данном месте. Приложенное напряжение также обладает некоторым распределением вероятностей. Согласно модели прочности вероятность того, что межвитковая изоляция не пробьётся, равна вероятности того, что пробивное напряжение межвитковой изоляции превосходит приложенное к ней напряжение. На рис. 1 графически представлена математическая модель надёжности межвитковой изоляции.

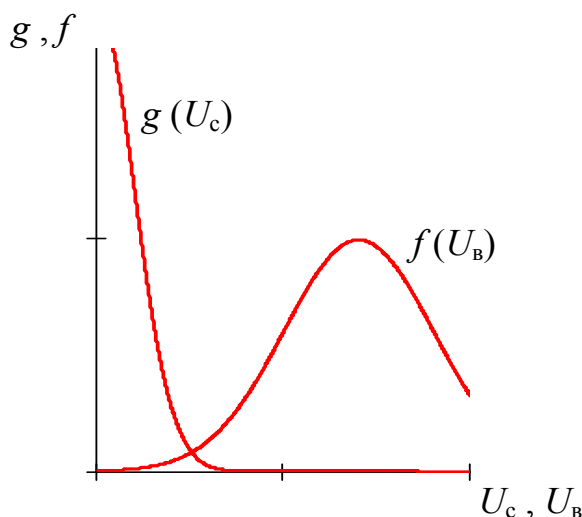


Рис. 1

Вероятность безотказной работы элемента межвитковой изоляции

$$P_3 = \int_0^{\infty} \int_{U_c}^{\infty} f(U_B) g(U_c) dU_B dU_c, \quad (1)$$

где $f(U_B)$ и $g(U_c)$ – плотности распределения пробивного и приложенного напряжений соответственно.

Математическая модель витковой изоляции имеет вид

$$P_{\text{мв}} = \prod_i \left\{ 1 - \sum_l \frac{0,975 s^2 l^{0,7} \exp(-0,278 l^{1,3})}{\sigma_{\text{Uci}}^2 \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp \left[\frac{(Vs/l - M_{\text{Uci}})^2}{2\sigma_{\text{Uci}}^2} \left(1 - \exp \frac{V^{\alpha_2}}{k_{\text{и}}^{\alpha_2} U_2} \right) \right]^\kappa dV \right\},$$

где l – разность номеров между соседними проводниками (проводники пронумерованы в порядке их намотки на шаблон); s – количество проводников в пазу; i – порядковый номер секции; V – напряжение, приложенное к проводникам с разностью номеров l ; M_{Uci} – математическое ожидание напряжения на i -й секции; σ_{Uci} – среднее квадратичное отклонение напряжения, приложенного к i -й секции; $k_{\text{и}}$ – коэффициент импульса; α_2 , U_2 – параметры распределения Вейбулла (для пробивных напряжений); k – количество включений электродвигателя за заданную наработку.

Вторая математическая модель для межвитковой, корпусной и межфазной изоляции также основана на модели прочности, но параметром, характеризующим электрическую прочность изоляции является дефектность.

При построении математической модели приняты следующие положения и допущения. Отказ изоляции обмотки происходит в результате короткого замыкания (виткового, корпусного, межфазного), которое возможно только при существовании дефектов композиции витковой, корпусной и межфазной изоляции. Дефект может иметь место при поставке материалов, возникнуть в процессе изготовления обмотки (порезы, проколы, задиры, трещины) и образовываться в результате старения (трещины). Перекрытие промежутков между токоведущими частями в местах дефектов происходит в результате воздействия коммутационных перенапряжений, возникающих при пуске, отключении или реверсе электродвигателя. При расчёте вероятности отказа витковой изоляции учитываются только плотно касающиеся участки соседних витков. Принято, что отказ корпусной и межфазной изоляции может произойти только при повреждении всех слоёв в пределах элементарного участка.

Согласно математической модели вероятность отказа обмоток рассчитывают для последовательных интервалов времени наработки. Величина интервала выбирается такой, в пределах которой дефектность изоляции изменяется несущественно. Дефекты на слоях в пределах элементарного участка композиции изоляции принимаются совпадающими. Дефектность изоляции определяется на непропитанных обмоточных проводах, пазовой и межфазной изоляции, уложенных, а затем аккуратно извлечённых из паза. Влияние пропитки обмотки учитывается соответствующим коэффициентом. Исходная дефектность проводов определяется из предположения, что дефектна изоляция, имеющая сквозные повреждения. Дефектность определяется исходя из того, что дефекты расположены на длине случайно и распределены по длине провода по закону Пуассона.

В методику расчёта введено понятие элементарного участка длиной $l_{\text{эл}}$. Величина $l_{\text{эл}}$ определяется из условия равенства вероятности отказа в месте дефекта на одном из касающихся витков с учётом дефектов на другом витке

только в пределах $l_{эл}$. При этом считают, что все дефекты на расстоянии меньшем или равном $l_{эл}$ совпадают.

На основании теоремы умножения вероятность безотказной работы обмотки

$$P_{об} = P_{мв} P_{п} P_{мф}, \quad (2)$$

где $P_{мв}$, $P_{п}$ и $P_{мф}$ – вероятности безотказной работы межвитковой, корпусной и межфазовой изоляции соответственно. Вероятность безотказной работы корпусной и межфазовой изоляций значительно выше чем у межвитковой; для $\tau = 10\,000$ ч $P_{п} P_{мф} \approx 0,9999$, а для $\tau = 20\,000$ ч $P_{п} P_{мф} \approx 0,995$, поэтому при выполнении расчётов всыпной обмотки можно ограничиться расчётом надёжности межвитковой изоляции, выполнив затем корректировку результатов расчёта.

Расчётные формулы, входящие в математическую модель, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта надёжности межвитковой изоляции асинхронных двигателей со всыпной обмоткой

Наименование параметров и их условные обозначения	Выбор величины параметра
Наработка, для которой определяется вероятность безотказной работы $P_{об}$, τ , ч	Задаётся в ТЗ (ТУ); по ГОСТ 19523-74 $\tau = 10^4$ ч при $P_{об} = 0,9$
Вероятность наличия хотя бы одного дефекта изоляции провода длиной 100 мм после укладки обмотки q_1	При отсутствии экспериментальных данных $q_1 = 0,1 \div 0,35$
Периметр свободной площади слоя обмотки Π , мм	Для двухслойной обмотки $\Pi = b_1 + b_2 + h_{п1}$; для однослойной $\Pi = b_1 + b_2 + 2h_{п1}$
Коэффициент, характеризующий качество пропитки, $k_{пр}$	При отсутствии экспериментальных данных $k_{пр} = 0,3 \div 0,7$
Длина образца провода $l_{обр}$, мм	Можно принять $l_{обр} = 100$ мм
Среднее значение \bar{U}_1 , кВ и среднее квадратичное отклонение фазных коммутационных перенапряжений $\sigma_{\bar{U}_1}$, кВ	При отсутствии экспериментальных данных $\bar{U}_1 = 1,3 \div 1,6$ кВ; $\sigma_{\bar{U}_1} = 0,3 \div 0,4$ кВ
Длина элементарного участка $l_{эл}$, мм	Принимают $l_{эл} = 0,11 \div 0,12$ мм
Средняя допустимая температура обмотки \bar{t} , °С, её среднее квадратичное отклонение $\sigma_{\bar{t}}$, °С	Для класса В $\bar{t} = 120^\circ\text{C}$; для F $\bar{t} = 140^\circ\text{C}$; для H $\bar{t} = 165^\circ\text{C}$; $\sigma_{\bar{t}} = 5^\circ\text{C}$
Максимально допустимая температура для данного класса нагревостойкости изоляции t_0 , °С	Для класса В $t_0 = 130^\circ\text{C}$; для F $t_0 = 155^\circ\text{C}$; для H $t_0 = 180^\circ\text{C}$

Среднее значение напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка толщиной, равной двусторонней толщине изоляции \bar{U}_z , и среднее квадратичное отклонение его $\sigma_{\bar{U}_z}$, кВ	Принимают $\bar{U}_z = 0,8 \div 1$ кВ; $\sigma_{\bar{U}_z} = 0,2 \div 0,3$ кВ
Частота включений электродвигателя $f_{\text{вкл}}$	Принимается по ОСТ 16.0.510.037-78 в зависимости от предполагаемой группы эксплуатации. Для нормальной группы эксплуатации $t_{\text{вкл}} = 2 \div 10 \text{ ч}^{-1}$
Коэффициенты уравнения, определяющие скорость роста дефектности витковой изоляции	При отсутствии экспериментальных данных можно принять $c_b = (0,1 \div 0,2) \times 10^{-6} (\text{мм} \cdot \text{ч})^{-1}$; $a_b = (0,04 \div 0,08) ^\circ\text{C}$

П р и м е ч а н и е. Для выполнения расчётов необходимы также следующие исходные данные [3]: $k_{\text{сл}}$ – количество слоёв обмотки; $N_c = N_{\text{пл}} c / k_{\text{сл}}$ – количество элементарных витков секции; $\Delta_{\text{пр}} = d' - d$ – двусторонняя толщина провода c ; $k_{\text{п}}$; z_1 ; a_1 ; $l_{\text{ср1}}$; d' .

Порядок расчёта представлен в табл. 2.

Таблица 2

Порядок расчёта надёжности выпных обмоток статора асинхронного двигателя

Наименование параметра	Формула
Дефектность витковой изоляции до начала эксплуатации электродвигателя $(\text{мм})^{-1}$	$\lambda_0 = -\ln(1 - q_1) k_{\text{пр}} / l_{\text{обр}}$
Вероятность плотного касания соседних витков	$q = 0,93 \sqrt{k_{\text{п}}}$
Количество проводников, находящихся в наружном слое секции (по периметру секции)	$N_{\text{ви}} = N_c - N_{\text{нар}}$
Доля пар соседних элементарных витков, принадлежащих к одному эффективному	$P_{\text{п}} = \left[1 - \left(1 - \frac{c-1}{N_c} \right)^3 \right] \left(\frac{N_c}{2N_c - c} \right)$
Общая длина пар соседних витков в обмотке (мм)	$L = (1 - P_{\text{п}})(N_{\text{нар}} + 1,5N_{\text{ви}} - 1,5) k_{\text{сл}} l_{\text{ср1}} z_1$
Количество последовательно соединённых секций в фазе	$n_c = z_1 k_{\text{сл}} / (6a_1)$

<p>Среднее значение и среднее квадратическое отклонение величин фазных коммутационных перенапряжений на секции (кВ)</p> <p>Номинальное фазное напряжение, приходящееся на секцию (кВ)</p> <p>Вероятность отказа витковой изоляции при воздействии одного импульса перенапряжения и при условии, что на касающихся витках имеются совпадающие дефекты</p> <p>Скорость роста дефектности витковой изоляции (мм^{-1})</p> <p>Вероятность возникновения короткого замыкания витковой изоляции на длине касающихся витков в течение времени τ</p> <p>Вероятность отказа межвитковой изоляции в течение времени τ</p> <p>Вероятность безотказной работы межвитковой изоляции в течение времени τ</p> <p>Вероятность безотказной работы обмотки статора $P_{\text{об}}$ за время τ (для $\tau = 10\,000$ ч $\rightarrow P_{\text{п}}P_{\text{мф}} = 0,999$; для $\tau = 20\,000$ ч $\rightarrow P_{\text{п}}P_{\text{мф}} = 0,995$)</p>	$\bar{U}_c = \bar{U}_1 / n_c$ $\sigma_{\bar{U}_c} = \sigma_{\bar{U}_1} / n_c$ $U_c = \sqrt{2} U_1 10^{-3} / n_c$ $q_z = \frac{3(7 \cdot 10^{-3} U_c + 0,154 \cdot 10^{-3} \bar{U}_c)}{\Delta_{\text{пр}}} B,$ <p>где</p> $B = \int_0^1 F \left(\frac{k \bar{U}_c - \bar{U}_z}{\sqrt{k^2 \sigma_{\bar{U}_c}^2 + \sigma_{\bar{U}_z}^2}} \right) k(k-1)^2 dk;$ <p>k – крайность коммутационных перенапряжений.</p> $H_B = c_B \exp[0,0014 f_{\text{вкл}} + a_B (\bar{t} - \bar{t}_0 + 0,5 a_B \sigma_{\bar{t}}^2)]$ $P_1 = 2 l_{\text{эл}}^2 q q_z f_{\text{вкл}} \left(\lambda_0^2 \tau + \lambda_0 H_B \tau^2 + \frac{H_B^2}{3} \tau^3 \right)$ $Q_{\text{мв}} = 1 - (1 - P_1)^{L/l_{\text{эл}}}$ $P_{\text{мв}} = 1 - Q_{\text{мв}}$ $P_{\text{об}} = P_{\text{мв}} P_{\text{п}} P_{\text{мф}}$
---	--

Третья математическая модель относится к оценке надёжности стержневой обмотки. В основу методики оценочного расчёта надёжности стержневой обмотки, предложенной ВНИИ Электромаш, положен закон кинетики химических реакций (закон Вант-Гоффа–Аррениуса)

$$\ln T_0 = B/\theta - G,$$

где T_0 – средний (условный) срок службы изоляции, в годах; θ – средняя годовая температура изоляции, $^{\circ}\text{K}$; $B = 10^4$ $^{\circ}\text{K}$ и $G = 14,3$ – постоянные закона кинетики химических реакций для микалентной изоляции.

Коэффициент запаса электрической прочности изоляции $k'_0 = U_0/U_n$, где U_0 – пробивное напряжение изоляции (электрическая прочность) стержня в исходном (до укладки в паз) состоянии; U_n – номинальное напряжение.

Этот коэффициент определяет свойства изоляции стержней непосредственно после их изготовления и может быть найден путём испытаний.

В процессе транспортировки и укладки стержней в пазы электрическая прочность изоляции несколько снижается. Поэтому фактический коэффициент запаса электрической прочности будет равен $k_0 = k'_0(1 - \alpha_0)/k \approx 0,75 \cdot k'_0/k$, где $\alpha_0 = 0,25 \div 0,75$ – коэффициент, учитывающий снижение электрической прочности изоляции; k – кратность возможных перенапряжений; $k_0 = 3 \div 6$ и $k'_0 = 7 \div 9$.

Согласно предложенной методике изменение электрической прочности изоляции во времени может быть выражено уравнением $k_t = k_0 \cdot 2^{-\sqrt{t/T_0}}$, где k_t – коэффициент запаса электрической прочности изоляции в функции от времени (для произвольного момента времени).

Пробой наступает при $k_t = 1$, т.е. когда пробивное напряжение изоляции становится равным kU_n . Для этого момента времени $t = T_{cp}$ и $k_0 = 2^{\sqrt{T_{cp}/T_0}}$.

Отсюда наработка на отказ составляет $T_{cp} = (\lg k_0 / \lg 2)^2 \cdot T_0 = (\lg k_0)^2 \cdot T_0 / 0,091$.

Соответствующее значение интенсивности отказов $\lambda(0) = 0,091 / (\lg k_0)^2 \cdot T_0$ или для любого произвольного момента времени в интервале $0 \dots T_{cp}$ $\lambda(t) = 0,091 / (\lg k_t)^2 \cdot T_0$.

Тогда вероятность безотказной работы стержня

$P_{ст}(t) = P(k) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)$, где $P(k)$ – вероятность того, что перенапряжения

не превысят расчётной кратности.

Вероятность безотказной работы обмотки $P_{обм}(t) = [P_{ст}(t)]^{2z}$, где z – число пазов статора.

Эта методика учитывает только износные отказы, а поэтому носит ориентировочный характер, что позволяет пользоваться ею только при сравнительных расчётах.

Пример 1.1. Определить надёжность обмотки статора турбогенератора с микалентной изоляцией по следующим данным: коэффициент запаса электрической прочности изоляции стержня $k_0 = 4,5$; среднегодовая температура изоляции 60°C ; число пазов статора $z_1 = 48$; расчётное время эксплуатации 20 лет.

Решение

Для рассматриваемого типа изоляции $E_a/R = 0,99 \cdot 10^4$ и $G = 14,33$ [3]. Тогда можно определить условный срок службы изоляции $\ln T_0 = E_a/R \cdot \theta - G = 0,99 \cdot 10^4 / (273 + 60) - 14,33 = 15,37 \rightarrow T_0 = e^{15,37} = 4732670 \text{ ч} \approx 548 \text{ лет}$.

Вероятность безотказной работы стержня при $k = 1$ $P_{ст}(t) = P(k) \cdot \exp[-2(\gamma - \ln \gamma - 1)] = 1 \cdot \exp[-2(1,0965 - 0,0922 - 1)] = \exp(-0,086) = 0,9914$, где $P(k)$ – вероятность того, что перенапряжения на обмотке не превысят расчётной кратности; $\gamma = \lg k_0 / [\lg k_0 - 0,3(t/T_0)^{0,5}] = \lg 4,5 / [\lg 4,5 - 0,3(20/546)^{0,5}] = 1,0965$.

Надёжность обмотки $P_{обм}(t) = [P_{ст}(t)]^{2z} = (0,9914)^{2 \cdot 48} \approx 0,427$.

2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

2.1. Особенности электрических машин как объектов оценки надёжности

Производство электрических машин в настоящее время достигло больших масштабов. Трудно назвать другие промышленные изделия, которые имели бы такое массовое применение во всех отраслях производства, а также в быту. Поэтому технический прогресс в любой области техники в значительной степени зависит от качества применяемых электрических машин и надёжности их в эксплуатации.

Низкая надёжность выражается, прежде всего, в том, что возрастает стоимость эксплуатации оборудования из-за частых ремонтов, монтажных и наладочных операций. С другой стороны, выход из строя электрических машин сопровождается простоями технологического оборудования, убытки от которого в масштабе страны даже трудно учесть, но несомненно, что во многих случаях аварийный простой электрических машин в течение (5 ... 10) часов наносит убытки, превышающие себестоимость их производства.

Важной особенностью электрической машины как системы элементов является тесное взаимодействие последних, что существенно отражается на свойствах электрических машин. По этой причине поэлементное испытание на надёжность широко применяемое при оценке надёжности, например, устройств в радиоэлектронике и автоматике для электрических машин является малоценным. Например, элемент расчёта надёжности всыпной обмотки – пара соседних активных проводников – имеет совершенно различные свойства в пазу и вне паза. Следовательно, достоверное представление о надёжности машины может дать или испытание её в целом, или испытание её основных узлов.

С другой стороны, испытания электрических машин на надёжность связаны с большими трудностями и значительными материальными затратами. Это определяется их относительно высокой стоимостью и большим ресурсом, от которого зависит продолжительность испытаний. Практически можно говорить об испытаниях на надёжность лишь машин малой мощности (микромашин). Для её снижения приходится переходить на выборки малого объёма, что снижает достоверность результатов.

Невозможность испытаний на надёжность крупных машин частично компенсируется статистическими данными об их надёжности в эксплуатации. Эта статистика может быть использована для оценки эксплуатационной надёжности таких машин, однако получение этих данных требует значительного времени. В процессе же разработки новых конструкций приходится обычно ограничиваться испытаниями отдельных деталей, узлов или макетов.

Ни контрольные, ни типовые т.е. промышленные испытания электрических машин не дают достаточных сведений об их надёжности, для

определения которой требуются специальные испытания. Однако результаты этих испытаний могут быть использованы не только для обнаружения явного брака. Статистически обработанный материал, например, приём – сдаточных испытаний позволяет оценить качество и стабильность технологического процесса, а именно:

- ток холостого хода, например, асинхронного двигателя, зависит от величины воздушного зазора;
- потери холостого хода связаны с качеством листовой стали и сборки пакетов;
- сопротивление обмотки характеризует качество намотки: натяжение провода, колебания его диаметра и т.п.;
- сопротивление обмотки ротора зависит от качества заливки и т.д.

Для электрических машин, особенно микромашин, характерно большое разнообразие типов исполнений. Каждый из них имеет свои слабые места и требует особого подхода при разработке модели надёжности. В большинстве случаев конструкции электрических машин далеки от соблюдения принципа равнопрочности:

- в асинхронных двигателях основной источник отказов – обмотка статора;
- в машинах постоянного тока – коллекторно–щёточный узел;
- в микромашинах, особенно высокоскоростных, – подшипниковый узел.

Не менее разнообразны и условия применения электрических машин, режимы их работы и соответственно требования к надёжности, например:

- для авиационных машин более существенным требованием является безотказность;
- для энергетических машин – долговечность и т.п.

Таким образом, количественные показатели надёжности электрических машин могут быть получены только для определённых условий эксплуатации. При этом факторы, от которых зависит надёжность, также должны быть выражены в виде количественных показателей.

Оценивать количественно следует и физические свойства материалов, применяемых в электрических машинах, и их изменение в процессе эксплуатации. Следовательно, прогнозирование надёжности электрических машин основывается на количественном анализе изменения свойств материалов и конструкций под действием внешних и внутренних факторов. Очень часто эти изменения могут быть представлены в виде зависимостей не только статистического, но и функционального характера.

При оценке существующего уровня надёжности электрических машин необходимо учитывать, что на протяжении нескольких десятков лет электромашиностроение развивалось в направлении повышения использования машин: увеличение нагрузок активных материалов, снижение массы на единицу мощности. При этом совершенствовались методы проектирования и производства, разрабатывались и внедрялись новые виды активных, конструкционных и изоляционных материалов, улучшались способы охлаждения. Однако запас прочности и перегрузок в общем

постепенно снижался. Потребовалось определённое время, чтобы стало общепризнанным то обстоятельство, что повышение использования активных материалов целесообразно лишь до тех пор, пока оно не ведёт к снижению надёжности.

Повышение надёжности связано с определёнными материальными затратами. Поэтому обоснованное решение этой проблемы должно содержать экономическое исследование вопроса. Для каждого типа и назначения электрической машины и конкретных условий её применения должны быть разработаны и экономически обоснованы оптимальные показатели безотказности и долговечности.

Повышение долговечности неремонтируемых машин обычно экономически целесообразно. Исключением являются лишь случаи, когда для увеличения срока службы требуется применение: дорогостоящих или дефицитных материалов, либо – трудоёмкой технологии, либо – долговечность машины превосходит долговечность системы, где она работает.

В отношении ремонтируемых машин проблема долговечности стоит иначе. По мере старения материалов и износа частей быстро увеличиваются затраты на ремонт и убытки от простоев, так что рано или поздно дальнейшее восстановление машины становится экономически нецелесообразным, особенно с учётом морального износа. С другой стороны, относительная величина амортизационных отчислений естественно уменьшается с увеличением срока службы. Таким образом, возникает понятие оптимальной долговечности, которая определяется минимумом удельных (в единицу времени), например, годовых, затрат потребителя.

Пусть общие затраты потребителя составляют $C = C_1 + C_2 + C_3$, где $C_1 = A$ – цена машины; C_2 – текущие эксплуатационные расходы, пропорциональные времени работы (электроэнергия, обслуживание, плановая профилактика и т.п.), т.е. $C_2 = B \cdot t$; C_3 – расходы на ремонт и убытки от простоев, которые пропорциональны общему числу отказов за время t .

Чтобы решить задачу аналитически, можно заменить начальный участок кривой нормального распределения степенной функцией, тогда $C = A + B \cdot t +$

$+ D \cdot t^n$. Удельные затраты $\frac{C}{t} = \frac{A}{t} + B + D \cdot t^{n-1}$ оказываются минимальными при

$$t = T_{\text{опт}} = \sqrt[n]{\frac{A}{(n-1)D}}, \text{ где } T_{\text{опт}} - \text{оптимальная долговечность.}$$

Из уравнения видно, что $T_{\text{опт}}$ растёт с увеличением стоимости машины и с повышением её надёжности.

Таким образом, проблема надёжности электрических машин может быть решена только общими усилиями исследователей, проектировщиков, конструкторов, технологов, эксплуатационников, а также работников многих других звеньев.

2.2. Учёт вопросов надёжности при проектировании и производстве

В противоположность устройствам радиоэлектроники и автоматики электрические машины лишь в редких случаях допускают повышение надёжности за счёт схемных решений. Хотя выбор типа и схемы обмотки, чисел пазов, проводников в пазу и т.п. оказывает определённое влияние на свойства машины в отношении её безотказности и долговечности. Однако основным путём этих свойств является повышение качества проектирования и изготовления. Недостатки конструкции отражаются преимущественно на долговечности, в то время как дефекты технологии – на интенсивности внезапных и приработочных отказов.

Обеспечение требуемых характеристик машины является главной задачей проектирования. Но при её решении надо также производить предварительную оценку конструкционной надёжности машины. Это целесообразно выполнять в три этапа.

На первом этапе производится расчёт и сравнение показателей надёжности для различных вариантов исполнения машины и выбирается вариант оптимальный во всех отношениях. На данной стадии для расчёта не требуется ещё знать точных значений показателей надёжности отдельных элементов машины, так как производится лишь сравнительная оценка рассматриваемых вариантов.

На втором этапе выполняется углублённое исследование надёжности выбранного варианта, с тем чтобы обеспечить выполнение заданных условий. При этом требуется уже знать точное значение показателей надёжности элементов. Производство современных электрических машин в большинстве случаев имеет серийный характер, что сообщает машинам каждой серии значительную степень подобия и облегчает экстраполяцию показателей надёжности на новые образцы. Количественные показатели надёжности комплектующих изделий должны быть выданы поставщиком.

Третий этап контроля надёжности включает испытание опытных образцов и сравнение результатов с расчётными значениями. Практически этот этап реализуем лишь для машин малой мощности, так как испытания на надёжность крупных машин неприемлемы по экономическим соображениям. Результаты расчётов и испытаний позволяют вносить соответствующие коррективы в конструкцию, материалы и обмоточные данные окончательного варианта исполнения машины.

Важнейшими средствами повышения надёжности электрической машины являются упрощение её конструкции и применение для её изготовления качественных активных и конструкционных материалов.

Вместе с этим необходимо обеспечить также сохранение на надлежащем уровне и других технико-эксплуатационных показателей: удельного расхода активных и конструкционных материалов (на единицу мощности), минимальных габаритов и стоимости. Эти требования находятся в известном противоречии с условиями выбора средств для повышения надёжности. Поэтому при проектировании необходим детальный анализ всех

мероприятий для получения заданной надёжности машины при минимальных весовых и габаритных показателях, а также – надлежащих её пусковых и рабочих характеристик.

Иными словами, в процессе проектирования и изготовления электрической машины необходимо стремиться к выполнению следующих основных требований:

- максимальное упрощение конструкции машины в целом, а также – её узлов и деталей;
- выбор электромагнитных нагрузок с учётом как требований получения заданной надёжности, так и обеспечения минимальных весовых и габаритных показателей;
- уменьшение рабочей температуры машины путём применения, в случае необходимости и возможности, надлежащих средств для её охлаждения;
- устранение вибраций машины в диапазоне рабочих скоростей вращения путём выбора надлежащих размеров корпуса и других частей и тщательной балансировки ротора;
- применение для изготовления машины качественных активных и конструкционных материалов, в особенности теплостойких корпусной изоляции и обмоточных проводов;
- совершенствование технологии изготовления машины с надлежащей организацией пооперационного контроля отдельных её деталей и процесса сборки;
- тщательное проведение типовых испытаний макетных и опытных образцов на соответствие техническим требованиям по надёжности;
- разработка технических условий, норм и инструкций по монтажу, ремонту и эксплуатации.

3. НАДЁЖНОСТЬ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

3.1. Закономерности старения изоляции, основные понятия и определения

Надёжность электрической машины в значительной степени определяется надёжностью обмоток, которая в свою очередь зависит от состояния изоляции.

Изоляция работает в сложных, часто весьма неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также во время их хранения и транспортировки они подвергаются разнообразным внешним воздействиям, приводящим с течением времени к прогрессирующему ухудшению её свойств.

Основной характеристикой изоляции является её *электрическая прочность*. Однако это важнейшее свойство изоляция может сохраниться в процессе эксплуатации лишь при наличии многих других качеств, снижение уровня которых приводит к уменьшению электрической прочности.

Изоляция должна сохранять высокую теплопроводность, в противном случае неизбежно возникновение повышенных местных нагревов, сопровождающихся ускорением её разрушения.

Изоляция должна обладать достаточной механической прочностью и эластичностью, которые исключали бы возможность образования остаточной деформации, трещин, расслоения её под действием механических усилий.

Изоляция должна сохранять стабильный химический состав, ибо его изменение приводит к снижению её электрической прочности.

Изоляция должна иметь устойчивую структуру, так как лишь однородная и монолитная структура может обладать всеми перечисленными выше свойствами.

В зависимости от конкретных условий работы к изоляции могут предъявляться и различные другие требования, например такие, как химическая стойкость, морозоустойчивость, тропикостойкость и пр.

Необратимые изменения структуры и химического состава изоляции, происходящие под воздействием указанных выше факторов в совокупности, называется её *старением*.

Процесс ухудшения свойств изоляции в результате старения называется *износом*.

Таким образом, термин «старение» относится к материалу, а термин «износ» – к изоляционной конструкции.

В отдельных случаях износ может и не быть следствием старения, кроме того, возможны повреждения изоляции не связанные с износом: продавливание, прорезание её острыми кромками металлических деталей, образование трещин вследствие значительных напряжений при изгибе и т.п. Такие местные дефекты часто развиваются сравнительно быстро и приводят к пробое изоляции задолго до существенного ухудшения её свойств во всём объёме вследствие электрического или термоокислительного разрушений.

Если скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов, то на образование местных дефектов оказывает значительное влияние также уровень технологии и общей культуры производства, условия хранения электрических машин, их транспортировки и монтажа.

3.2. Старение изоляции под действием температуры

Среди различных факторов, определяющих срок службы изоляции электрических машин, одним из основных является старение изоляции под действием температуры. Это явление лучше других поддаётся количественному учёту, а поэтому сравнительно подробно исследовано.

С точки зрения температурных воздействий на изоляцию различают понятия «теплоустойчивость» и «нагревостойкость».

Теплоустойчивостью называют способность электроизоляционного материала сохранять свои свойства на определённом уровне при относительно кратковременном перегреве. Материал не должен при этом разрушаться, менять свои химические свойства, не должно возникать пластических деформаций, вытекание или разрушение связующего и т.п.

Нагревостойкость характеризует способность материала без существенного ухудшения характеристик выдерживать воздействие предельно допустимой для данного типа изоляции температуры в течение периода времени, соответствующего сроку службы машины, и при обусловленных величинах других эксплуатационных воздействий.

Как видно, с практической точки зрения нагревостойкость является более важной характеристикой изоляции, поэтому именно она положена в основу классификации изоляционных материалов.

Поскольку нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур, особое значение приобретают методы расчёта скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Первые работы в этом направлении имели, главным образом, опытный характер и относились к изоляции класса А. В результате было сформулировано правило «восьми градусов» (правило Монтзигера). В соответствии с этим правилом повышение температуры на каждые 8°C сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое.

$$T = T_0 \cdot 2^{\frac{v}{\Delta v}} = T_0 \cdot e^{-0,0866v}, \quad (3)$$

где v – температура нагрева изоляции, °C; T – срок службы изоляции при этой температуре (в годах); T_0 – срок службы изоляции при так называемых «нулевых» условиях (при $v = 105^\circ\text{C}$ составляет $6,225 \cdot 10^4$ лет); $\Delta v = 8^\circ\text{C}$ – превышение температуры над допустимой, при которой срок службы изоляции сокращается в два раза.

П р и м е ч а н и е. Установлено, что величина $\Delta v = 8^\circ\text{C}$ соответствует только классу А – для других классов изоляции она повышается до $(10 \div 12)^\circ\text{C}$, а именно чем выше класс нагревостойкости, тем медленнее

происходит её старение при соответствующей предельно допустимой температуре.

Уравнение для любого класса нагревостойкости изоляции может быть представлено в логарифмической форме

$$\ln T = \ln T_0 - k \cdot v, \quad (4)$$

где $k = \ln 2 / \Delta v$. Из уравнения (4) видно, что логарифм срока службы изоляции линейно зависит от температуры.

Несмотря на эмпирический характер уравнения (4), оно находит известное практическое применение и позволяет производить ориентировочные расчёты в тех случаях, когда они относятся к сравнительно небольшим отрезкам времени и небольшим диапазонам изменения температуры.

Пример 3.1. Воспользовавшись правилом «восьми градусов», оценить срок службы изоляции класса А, если её рабочая температура составляет: 105°C; 113°C.

Решение

Воспользуемся формулой (4).

При $v = 105^\circ\text{C}$ $\ln T = \ln(6,225 \cdot 10^4) - (\ln 2 / 8) \cdot 105 = 11,0389 - 9,0976 = 1,94 \rightarrow T = e^{1,94} = 6,9678 \approx 7$ лет.

При $v = 113^\circ\text{C}$ $\ln T = \ln(6,225 \cdot 10^4) - (\ln 2 / 8) \cdot 113 = 11,0389 - 9,7907 = 1,25 \rightarrow T = e^{1,25} = 3,4903 \approx 3,5$ года.

Более строгий подход к исследованию явления старения изоляции под влиянием температуры связан с применением общих законов кинетики химических реакций. Существует следующая зависимость скорости протекания химических реакций от температуры:

$$\ln K = \frac{B}{\vartheta} + A, \quad (5)$$

где ϑ – абсолютная температура (градусы Кельвина); K – постоянная скорости реакции.

Коэффициенты A и B в уравнении (5) имеют определённый физический смысл и связаны с постоянными, характеризующими состав и структуру вещества, участвующего в реакции.

$$\ln T = \frac{B}{\vartheta} - G, \quad (6)$$

где $B = E_a / R$ и G – постоянные, характеризующие состав и структуру вещества [4]; E_a – избыточное по сравнению со средней величиной количество энергии (энергия активации), которым должна обладать молекула вещества, чтобы оказаться способной к химическому взаимодействию; $R = 8,32$ Дж/град·моль – универсальная газовая постоянная.

На основании этого, зная срок службы изоляции T_1 при температуре ϑ_1 , можно определить её срок службы T_2 при температуре ϑ_2 из следующего уравнения:

$$T_2 = T_1 \cdot \exp \left[-B \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_2} - \frac{1}{\vartheta_1} \right) \right]. \quad (7)$$

Пример 3.2. Уточнить срок службы изоляции класса А по данным примера 3.1, воспользовавшись законом кинетики химических реакций.

Решение

Экспериментальное значение E_a/R для класса изоляции А согласно [4] составляет $0,95 \cdot 10^4$ °К. Тогда, учитывая найденные в примере 3.1 сроки службы изоляции при температуре $\vartheta_1 = 273 + 105^\circ\text{К}$ и температуре $\vartheta_2 = 273 + 113^\circ\text{К}$, найдём

$$T_2 = T_1 \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{\vartheta_2} - \frac{1}{\vartheta_1} \right) \right] = 7 \cdot \exp [-0,95 \cdot 10^4 (1/378 - 1/386)] = 7 \cdot e^{-0,518} \approx$$

4,2 года.

Пример 3.3. Вследствие замыкания листов активной стали турбогенератора в зубцовой зоне возникло местное повышение температуры до 250°С . Определить время разрушения изоляции обмотки, считая, что она относится к классу В.

Решение

В соответствии с экспериментальными исследованиями [4]: $E_a/R = 1,02 \cdot 10^4$ °К и $G = 15,5$ для класса изоляции В, тогда по формуле (6) имеем $\ln T = 1,02 \cdot 10^4 / (273 + 250) - 15,5 = 4 \rightarrow T = e^4 = 54,598 \approx 55$ часов.

Поскольку такой расчёт учитывает лишь тепловое старение, а во время работы машины изоляция испытывает ещё электрические и механические воздействия, то можно предположить, что в действительности её разрушение вследствие пробоя произойдёт значительно раньше.

3.3. Старение изоляции под действием электрического поля

В процессе эксплуатации изоляция электрических машин длительное время находится под рабочим напряжением, а кроме того, периодически испытывает воздействие повышенных напряжений: при профилактических испытаниях и различных волновых явлениях.

Данные эксплуатации и экспериментов показывают, что заметное влияние электрического поля на срок службы изоляции начинает обнаруживаться в машинах с номинальным напряжением ≥ 6 кВ.

Электрическое старение происходит весьма медленно в новой и доброкачественной изоляции, достаточно плотной и монолитной. Оно постепенно ускоряется по мере развития общего разрушения, вызванного различными причинами (тепловые, механические, электрические и др.), сопровождающегося расслоением и разрыхлением изоляции, образованием в ней пор, пустот (воздушных или газовых прослоек), трещин. Различные микродефекты есть в той или иной степени и в новой изоляции, но по мере её старения их количество и размеры существенно увеличиваются.

С появлением таких неоднородностей в изоляции развиваются ионизационные процессы, сопровождающиеся прогрессирующим её разрушением. Ионы, разгоняющиеся в электрическом поле, бомбардируют поверхность изоляционных прослоек. В пустотах изоляции, особенно при

перенапряжениях, возникают частичные разряды, разрушающие отдельные слои изоляции за счёт теплового эффекта и механического расщепления. Кроме того, разряды сопровождаются химическими реакциями с образованием озона, взаимодействие которого с азотом воздуха и парами воды приводит к образованию азотной кислоты, разрушительно действующей на изоляцию.

Частичные разряды иногда приводят к так называемым незавершённым пробоям, когда пробивается лишь часть слоёв. С течением времени разряды становятся чаще, а напряжение их возникновения – меньше. Этот процесс завершается полным пробоем.

Кроме разрядов в толщине изоляции при определённых условиях возникают также поверхностные разряды, которые сопровождаются разрушением внешних слоёв изоляции. Если не принять мер против коронирования, то изоляция может выйти из строя в течение нескольких месяцев.

Влияние электрического поля на срок службы изоляции исследовано ещё недостаточно. Для оценки этого влияния иногда пользуются зависимостью вида

$$\lg T = \lg A_E - m \cdot \lg E \rightarrow T = A_E \cdot E^{-m}, \quad (8)$$

где A_E и m – постоянные, зависящие от свойств изоляционного материала.

П р и м е ч а н и е. Эти характеристики называются «кривыми жизни» изоляции и выражают зависимость времени T до пробоя образца от величины приложенного напряжения E .

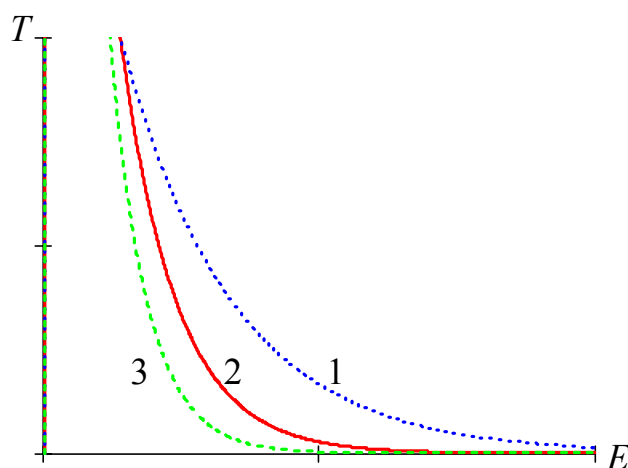


Рис. 2

Геометрический смысл характеристик ясен из рис. 2. Старение изоляции выражается в смещении «кривой жизни» параллельно её исходному состоянию (характеристика – 1) влево. Такое смещение отражает также влияние изменения качества сырья или технологии изготовления изоляции.

3.4. Старение изоляции под действием механических нагрузок

Одним из важнейших факторов износа и старения изоляции являются *механические* и *термомеханические* нагрузки.

К первым относятся статическое давление на изоляцию, изгибающие и скручивающие усилия, удары и вибрация.

Термомеханическими называют нагрузки, возникающие в результате периодических нагревов и охлаждения обмотки.

Источники механических воздействий: электродинамические силы, неуравновешенность вращающихся частей, центробежные усилия, толчки и удары, передаваемые со стороны приводов или механизмов.

В большинстве случаев перечисленные усилия имеют циклический, знакопеременный характер, причём наиболее типичной является вибрация с частотой 100 Гц. Периодически при переходных процессах (пуск, реверс, короткое замыкание и т.п.) амплитуды вибраций увеличиваются в десятки раз вследствие увеличения тока в обмотках и квадратичной зависимости электродинамических усилий от тока. Особо заметные усилия могут возникать в обмотках крупных машин –турбо и –гидрогенераторов.

Механические характеристики изоляции зависят от температуры. По мере нагревания предел прочности изоляции быстро снижается, причём одновременно изоляция становится более эластичной. Например, предел прочности микалентной компаундированной изоляции при растяжении составляет 3340 Н/см² при 20°С и лишь 344 Н/см² при 100°С. Значения эти могут колебаться очень существенно в зависимости от особенностей технологии, величины наработки и пр.

Современные сорта изоляции обладают значительной устойчивостью по отношению к статическим нагрузкам. Однако опыт показывает, что даже при сравнительно небольших деформациях имеет место существенное снижение пробивного напряжения, происходящее примерно по линейному закону. Для каждой температуры существует определённый предел деформации, за которым снятие нагрузки не приводит к восстановлению первоначальных диэлектрических свойств. Это свидетельствует о том, что значительные деформации сопровождаются появлением необратимых структурных изменений в виде трещин, разрывов, расслоения и т.п., а также – перераспределению связующего.

Хотя в среднем статические нагрузки изоляционных материалов в электрических машинах обычно невелики, в отдельных точках могут иметь место значительные концентрации механических напряжений, отражающихся на скорости старения изоляции.

Более существенное влияние на процесс разрушения изоляции электрических машин оказывают циклические знакопеременные нагрузки, возникающие под действием вибраций различного происхождения. В нормальном режиме работы вибрация обычно незначительна по амплитуде, но число циклов за время службы машины может достигать порядка 10^{10} .

При этом новая изоляция, прочная и эластичная, мало подвержена вибрационному старению, особенно при повышенных температурах, когда пропиточный компаунд обладает высокой пластичностью. По мере её старения разрушение изоляции под действием вибрации быстро прогрессирует. Этому способствует постепенное ослабление крепления обмотки как в пазах, так и в лобовых частях.

Воспроизведение в лабораторных условиях вибрационного старения изоляции сопряжено со значительными затратами времени и техническими трудностями. Поэтому такие испытания позволяют дать только косвенную оценку этого явления, в частности:

- вибрация представляет собой медленно действующий фактор, её последствия обнаруживаются лишь через значительное число циклов;
- в изоляции, подвергнутой искусственному старению, под воздействием вибрации наблюдаются дефекты, близкие по своему характеру к изменениям в изоляции со значительной наработкой;
- вибрационное старение вызывает наиболее резкое ухудшение состояния изоляции в местах выхода стержней или катушек из пазов, предполагается, что структурные изменения, вполне аналогичные наблюдаемым после ускоренных испытаний, имеют место при переходных процессах, когда амплитуды вибраций достигают значительных величин;
- действие вибрации на всыпные обмотки выражается в постепенном разрушении пропиточного лака, в результате чего нарушается цементация обмотки и отдельные проводники приобретают некоторую свободу перемещения. Это ведёт к разрушению витковой изоляции в точках соприкосновения проводников.

Из опыта следует, что вибрация сокращает срок службы изоляции в несколько раз.

Старение изоляции низковольтных машин, работающих при умеренных температурах обмоток, вообще не может быть объяснено с помощью тепловых или электрических явлений. В этом случае наиболее вероятными причинами, вызывающими постепенное разрушение изоляции, являются механические нагрузки и химическое воздействие окружающей среды.

Определённую роль в процессах разрушения изоляции играют термомеханические явления, связанные с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и проводников. Это приводит к образованию трещин, разбуханию изоляции, расслоению её и взаимному смещению отдельных слоёв.

3.5. Старение изоляции под действием влаги и химически активных веществ

Важным фактором старения изоляции является воздействие химически активных сред и влаги. Влага проникает в изоляцию главным образом в те периоды, когда последняя находится в нерабочем состоянии. Особенно

интенсивно процесс идёт при остывании изоляции после её работы, так как в этот период давление в её порах и капиллярах несколько ниже атмосферного.

Под действием влаги происходит гидролитическое разрушение изоляционных материалов, заключающееся в разрушении полимерных цепей. Периодическое проникновение влаги и удаление её увеличивает пористость изоляции. Эти процессы развиваются параллельно с другими явлениями старения изоляции и взаимно стимулируют друг друга.

Весьма вредное действие на изоляцию оказывают химически активные вещества: щёлочи, кислоты и их ангидриды, находящиеся в окружающей среде. Изоляцию разрушают также масла и пары растворителей. Пыль, содержащаяся в окружающем воздухе, оказывает на изоляцию абразивное действие.

Совокупное влияние на срок службы изоляции температуры, влажности и агрессивных сред можно оценить по следующему уравнению:

$$T = A \cdot e^{-B/\theta} \cdot C^{-m} \cdot \eta^{-n} \quad (9)$$

где C – концентрация агрессивного агента; η – относительная влажность.

Таким образом, процессы старения изоляции поддерживают и активизируют друг друга. Разрушение изоляции происходит постепенно, а начало ему даётся процессом теплового старения.

3.6. Надёжность всыпных обмоток

Надёжность обмотки статора асинхронных двигателей мощностью ≥ 5 кВт в значительной степени определяет их надёжность в целом. Большинство таких асинхронных двигателей выполняется с обмотками с мягкими секциями – всыпными. С точки зрения надёжности такую обмотку можно рассматривать как систему с последовательным соединением элементов. Поэтому для вероятности безотказной работы такой обмотки можно записать следующее уравнение:

$$P_{\text{обм}}(t) = P_{\text{в}}(t) \cdot P_{\text{п}}(t) \cdot P_{\text{мф}}(t) \cdot P_{\text{с}}(t), \quad (10)$$

где $P_{\text{в}}(t)$ – вероятность безотказной работы витковой изоляции; $P_{\text{п}}(t)$ – вероятность безотказной работы пазовой изоляции; $P_{\text{мф}}(t)$ – вероятность безотказной работы; $P_{\text{с}}(t)$ – вероятность безотказной работы межсекционной изоляции.

Из этих четырёх сомножителей наименьшим является первый. Он в основном и определяет надёжность всыпной обмотки. Его значение для надёжности всыпной обмотки обусловлено вполне объективными причинами:

- значительным количеством витков в обмотках этого типа;
- низкой электрической прочностью межвитковой изоляции;
- отсутствием объективных методов её контроля.

Рассматривая надёжность межвитковой изоляции с позиции построения математической модели, можно представить обмотку как изделие, состоящее из ряда элементов, характеристики которых существенно сказываются на надёжности изделия в целом.

Таковыми элементами можно считать два проводника, расположенные рядом в пазу или лобовой части обмотки и разделённые межвитковой изоляцией.

Для успешной работы обмотки необходима исправность всех входящих в неё элементов, так как пробой изоляции между любой парой соседних проводников приводит к отказу всей обмотки. Будем считать, что элементы отказывают независимо друг от друга, что вполне естественно. Для безотказной работы изделия (всей обмотки) в течение некоторого времени необходимо, чтобы каждый элемент работал безотказно в течение этого времени.

Подберём такую характеристику элемента, которая наиболее полно отражает его надёжность, удобна для построения модели, легко может быть определена экспериментально.

Отказ обмотки определяется возникновением межвиткового замыкания, а поэтому, наиболее показательной характеристикой естественно считать величину пробивного напряжения межвитковой изоляции. Действительно, изменение других характеристик межвитковой изоляции, например $R_{из}$, $\lg \delta$, механических свойств и т.п., в итоге приводит к уменьшению пробивного напряжения.

Элементы обмотки можно считать одинаковыми. Пробивное напряжение всех пар проводников подчинено определённой вероятности распределения.

Обмотка отказывает, если пробивается хотя бы одна пара соседних проводников. Отказ происходит тогда, когда напряжение, приложенное к соседним проводникам, превышает пробивное напряжение межвитковой изоляции. Приложенное напряжение также обладает некоторой вероятностью распределения.

Надёжность отдельного i -го элемента обмотки можно оценить следующим образом.

Введём обозначения: $f(u)$ – плотность распределения приложенного напряжения; $f(U)$ – плотность распределения электрической прочности изоляции.

Примерный вид этих характеристик показан на рис. 3.

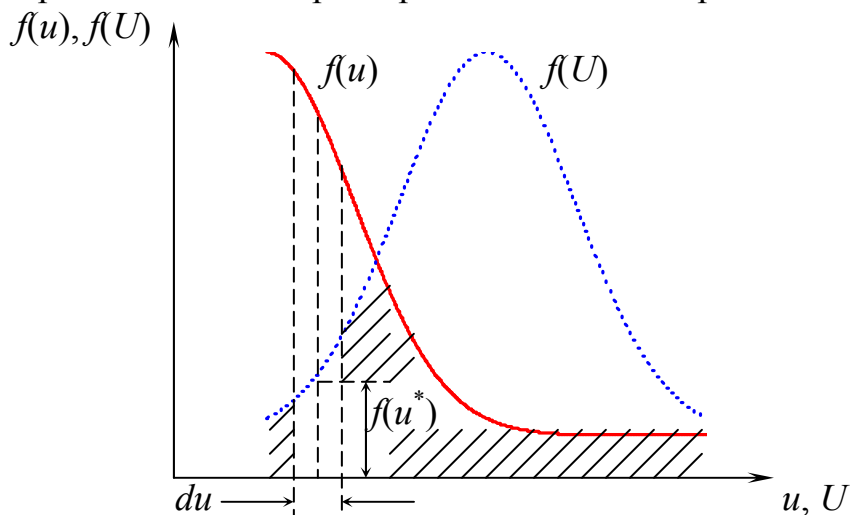


Рис. 3

Тогда вероятность безотказной работы i -го элемента в общем случае запишется как

$$P_i = P\{U > u\}. \quad (11)$$

Математически область перекрытия кривых $f(u)$ и $f(U)$, показанная штриховкой, характеризуется определённой вероятностью отказа.

Рассмотрим небольшой интервал du в области перекрытия. В соответствии с определением этого понятия вероятность того, что некоторое значение приложенного напряжения находится в этом интервале, равна площади элемента du , т.е.

$$P\{(u^* - du/2) \leq u(u^* + du/2)\} = f(u^*) \cdot du. \quad (12)$$

Вероятность того, что электрическая прочность превышает указанное значение приложенного напряжения u^* , записывается уравнением

$$P\{U \geq u^*\} = \int_{u^*}^{\infty} f(U) dU. \quad (13)$$

Таким образом, вероятность того, что значение приложенного напряжения заключено в интервале du , а электрическая прочность превышает это напряжение, в этом интервале определяется как произведение вероятностей

$$[f(u^*) \cdot du] \cdot \int_{u^*}^{\infty} f(U) dU.$$

В таком случае вероятность безотказной работы любого i -го элемента есть вероятность того, что электрическая прочность его превышает приложенное напряжение для всех возможных значений этого напряжения, т.е.

$$P_i = \int_0^{\infty} \{f(u) \cdot [\int_0^{\infty} f(U) dU]\} du.$$

В теории вероятностей интеграл вида $\int_{U_1}^{U_2} f(U) dU = F(U_2) - F(U_1)$ называется интегральной функцией распределения случайной величины.

В рассматриваемом случае интеграл, стоящий в квадратных скобках, показывает вероятность того, что случайная величина (электрическая прочность) находится между 0 и ∞ (практически между U и ∞). Тогда значение этого интеграла может быть записано в виде $\int_0^{\infty} f(U) dU = F(\infty) - F(U) = 1 - F(U)$,

где $F(U)$ – интегральная функция распределения электрической прочности.

В таком случае вероятность безотказной работы i -го элемента запишется как $P_i = \int_0^{\infty} \{f(u) \cdot [1 - F(U)]\} du$.

Поскольку обмотка состоит из n случайно выбранных i -х пар, то это эквивалентно выбору n случайных значений электрической прочности из совокупности величин задаваемых функцией $f(U)$, тогда функция распределения случайной величины будет иметь вид $[1 - F(U)]^n$, а для вероятности безотказной работы системы из последовательно соединённых элементов, т.е. витковой изоляции, получим

$$P_n = P_b = \int_0^{\infty} f(u) \cdot [1 - F(U)]^n du. \quad (14)$$

Таким образом, для расчёта надёжности межвитковой изоляции обмотки необходимо знать законы распределения электрической прочности и напряжения, приложенного к изоляции обмотки.

3.7. Математическая модель надёжности пазовой изоляции

Надёжность пазовой изоляции всегда намного выше, чем витковой. Это объясняется как более высокой её электрической прочностью, так и большей эффективностью методов её испытаний. Как правило, её дефекты выявляются уже на заводах–изготовителях.

Как и в случае витковой изоляции, для расчёта надёжности пазовой изоляции также необходимо знать как уровень приложенных или коммутационных перенапряжений, так и её электрическую прочность, в общем случае отдельных слоёв изоляционного материала. Для этого достаточно проведение испытаний образцов пазовой изоляции, извлечённой из пазов. Для расчёта надёжности пазовой изоляции можно воспользоваться следующей моделью.

Представим пазовую изоляцию цепочкой последовательно соединённых конденсаторов. Пробивное напряжение изоляционных материалов каждого такого конденсатора распределено по определённым законам. Условимся считать, что пробой пазовой изоляции соответствует пробоем всех конденсаторов.

Распределение напряжений на каждом i -м слое (конденсаторе) зависит от диэлектрической проницаемости ε_i и толщины слоя изоляции d_i .

Например, в случае двух слоёв могут быть записаны следующие известные соотношения:

$$E_1/E_2 = \varepsilon_2/\varepsilon_1; U_1 = E_1 \cdot d_1; U_2 = E_2 \cdot d_2; U = U_1 + U_2.$$

Исходя из этого для n -слойной изоляции можно получить уравнение для расчёта среднего напряжения, приходящегося на любой её слой, в следующем виде:

$$\bar{U}_i = U_i \cdot \frac{\frac{d_i}{\varepsilon_i} \cdot \prod_n \varepsilon_i}{\sum_n \left(\frac{d_i}{\varepsilon_i} \cdot \prod_n \varepsilon_i \right)}. \quad (15)$$

Вероятность пробоя элементарного участка, например, двухслойной изоляции как вероятность наступления двух событий одновременно можно записать как

$$Q_{эл} = Q(ab) = Q(a) \cdot Q_a(b) + Q(b) \cdot Q_b(a) - Q(a) \cdot Q(b), \quad (16)$$

где $Q(a)$ и $Q_b(a)$ – вероятность пробоя слоя “ a ” при непробитом и пробитом соответственно слое “ b ”; $Q(b)$ и $Q_a(b)$ – то же самое, но для слоя “ b ”.

Располагая распределением пробивного напряжения, можно определить вероятность пробоя отдельных слоёв изоляционных материалов при разном

сочетании пробитых и непробитых слоёв. При этом следует исходить из определённых амплитуд коммутационных напряжений, приходящихся на каждый слой изоляции, тогда вероятность пробоя изоляции в пазу

$$Q'_\pi = 1 - (1 - Q_{\text{эл}})^k, \quad (17)$$

где $k = S_\pi / S_{\text{эл}}$ – число элементарных участков изоляции в пазу; $S_{\text{эл}} = 78,5 \text{ мм}^2$ – площадь испытательного электрода; S_π – площадь изоляции стержня в пазу.

Потенциальная вероятность пробоя пазовой изоляции для всех z пазов (всей обмотки)

$$Q_\pi = 1 - (1 - Q'_\pi)^z. \quad (18)$$

Тогда вероятность её безотказной работы

$$P_\pi = 1 - Q_\pi. \quad (19)$$

Аналогичным образом может быть выполнен расчёт надёжности межфазной и межсекционной изоляций.

Пример 3.4. Определить вероятность отказа обмотки статора электрической машины переменного тока, если вероятность безотказной работы витковой изоляции $P_v(t) = 0,90$; пазовой изоляции $P_\pi(t) = 0,90$; межфазной изоляции $P_{\text{мф}}(t) = 0,95$; межсекционной изоляции $P_c(t) = 0,98$.

Решение

Поскольку отказ изоляции на любом участке ведёт к отказу обмотки, то система изоляции статора относится к системам с последовательным соединением элементов и вероятность её отказа определяется с учётом формулы (10).

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) = 1 - 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 1 - 0,75 = 0,25.$$

П р и м е ч а н и е. Вероятность безотказной работы $P_i(t)$ может быть как экспоненциальной, так и неэкспоненциальной функцией времени.

4. НАДЁЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

4.1. Причины выхода из строя подшипниковых узлов

Для большинства электрических машин подшипниковые узлы представляют собой второй по значению после обмотки источник отказов. В машинах же малой мощности и в высокоскоростных машинах отказы из-за износа и повреждений подшипниковых узлов часто становятся преобладающими.

Ненормальная работа подшипниковых узлов обнаруживается по чрезмерному повышению температуры, шума и вибрации, утечке смазки, повышенному сопротивлению при вращении и увеличению момента трогания. Это может быть вызвано различными причинами, среди которых значительное место занимает усталостное разрушение (около 80%).

Усталостное выкрашивание поверхностей колец и тел качения происходит под действием значительных местных перенапряжений, возникающих при работе подшипника. Выкрашивание начинается с появления поперечной трещины. В дальнейшем происходит образование раковины. Смазка в этом процессе играет двойственную роль: она уменьшает тангенциальные усилия (трение) и способствует отводу тепла, а с другой стороны, проникая в трещину, оказывает расклинивающее действие и способствует её развитию.

В подшипниках электрических машин общепромышленного применения преобладающей причиной отказов является *абразивный износ*. Проникновение в подшипник пыли, мелких твёрдых частиц, продуктов износа щёток, продуктов коррозии приводит к постепенному истиранию рабочих поверхностей и сепараторов. Попадание в подшипники инородных частиц возможно уже при монтаже из-за плохой промывки, небрежного хранения, заправки грязной смазкой и т.п. В дальнейшем проникновение абразивных частиц является результатом неправильного выбора исполнения машины по условиям применения, плохой работы уплотнений или их конструкции. Абразивное истирание несколько задерживает появление трещин усталостного характера, но приводит к увеличению зазоров в подшипниках, повышению вибрации, снижению точности их работы.

Износ подшипников сильно ускоряется при неправильном их выборе для данных нагрузок и скоростей вращения, при неправильной эксплуатации и наличии конструктивных дефектов подшипниковых узлов, например плохого теплоотвода.

Наиболее тяжёлые повреждения подшипников связаны с износом их деталей. Последнее происходит в результате перегрузок, неоднородности материала деталей, некачественной термообработки, плохого монтажа.

Подшипники качения весьма чувствительны к перегрузкам: при увеличении нагрузки на подшипник в 2 раза его долговечность сокращается примерно в 10 раз.

Нагрузки на подшипники возрастают (появляются перегрузки) при перекосах и несоосности подшипниковых щитов и фланцев, при осевом

смещении подшипника, при вибрации ротора и т.п. Слабая посадка подшипника на вал ведёт к проворачиванию внутреннего кольца, что сопровождается контактной коррозией, износом вала, повышением температуры. Посадка с чрезмерным натягом приводит к уменьшению радиальных зазоров, защемлению тел качения, быстрому износу сепараторов.

Резко уменьшают работоспособность подшипников микрповреждения рабочих поверхностей. Например, снижение чистоты дорожек качения с 10 до 9 класса уменьшает долговечность подшипника вдвое.

Дефекты монтажа подшипников не всегда легко обнаружить, так как контроль обычно ограничивается лишь проверкой лёгкости вращения вала, что не может служить гарантией продолжительности нормальной работы в эксплуатационных условиях.

4.2. Расчёт надёжности подшипниковых узлов

Номинальная долговечность подшипников качения, применяемых в электрических машинах общего назначения малой и средней мощности, обычно составляет $10 \div 20$ тыс. часов и более. Её определяют исходя из условий усталостного разрушения. Уравнение усталостной прочности имеет вид

$$\sigma_z = A / \sqrt[m]{N_{\text{ц}}}, \quad (20)$$

где σ_z – напряжение, соответствующее пределу контактной усталости; A – коэффициент износостойкости; $N_{\text{ц}}$ – число циклов напряжений за время работы; m – экспериментальный показатель, в среднем равный 10.

Уравнение может быть преобразовано так, чтобы в нём были отражены эксплуатационные факторы, влияющие на срок службы подшипника: нагрузка и скорость вращения, и работоспособность подшипника, зависящая от его типа:

$$n \cdot T_p = (C/Q)^\alpha \leftrightarrow \lg T_p = \alpha(\lg C - \lg Q) - \lg n, \quad (21)$$

где n – скорость вращения, об/с; T_p – срок службы подшипника, час; C – динамическая грузоподъёмность (коэффициент работоспособности) подшипника, Н; Q – приведённая динамическая нагрузка (с учётом осевой и радиальной составляющих сил, действующих на подшипник, его вибрации, кинематики, температуры и т.п.), Н; $\alpha = 3$ для шариковых подшипников и $\alpha = 10/3$ для роликовых подшипников.

Долговечность, рассчитываемая по приведённым выше уравнениям, в соответствии с ГОСТ определяется с вероятностью 0,9. Это означает, что не менее 90% подшипников данной группы при работе в одинаковых условиях должны проработать без появления признаков усталости металла не менее T_p часов.

Пример 4.1. Оценить срок службы шарикоподшипника с коэффициентом работоспособности $C = 4888$ Н, если приведённая нагрузка на него с учётом радиальной и осевой составляющих $Q = 38$ Н, а предельно возможная частота вращения $n = 1000$ об/мин.

Решение

Расчётную долговечность подшипника качения определяем исходя из условий усталостного разрушения материала (21), используя основные эксплуатационные факторы, влияющие на срок службы подшипника: нагрузку, частоту вращения, коэффициент работоспособности

$$\lg T_p = (10/3)(\lg C - \lg Q) - \lg n = 3,33(\lg 4800 - \lg 38) - \lg 1000 = 3,33(3,68 - 1,58) - 3 = 4 \rightarrow T_p = 10^4 = 10000 \text{ ч.}$$

П р и м е ч а н и е. В соответствии с ГОСТ–520–71 рассчитанная таким образом долговечность определяется с вероятностью 0,9 и называется поэтому теоретической.

Вероятность безотказной работы подшипника определяется по распределению Вейбулла

$$\ln \frac{1}{P} = 0,1053 \left(\frac{T}{T_p} \right)^e, \quad (22)$$

где P – вероятность безотказной работы; T – долговечность подшипника, соответствующая указанной вероятности безотказной работы; T_p – расчётная (номинальная) долговечность, соответствующая 90%-ной вероятности безотказной работы; $e = 10/9$ – для шарикоподшипников и $e = 9/8$ – для роликоподшипников.

Если необходимо рассчитать долговечность всех подшипников, установленных в данном механизме, то рекомендуется пользоваться следующим уравнением:

$$\frac{1}{T_\Sigma^e} = \frac{1}{T_1^e} + \frac{1}{T_2^e} + \dots + \frac{1}{T_n^e}, \quad (23)$$

где T_Σ – долговечность системы; T_n – долговечность n -го подшипника, входящего в систему.

Возможен и другой подход к определению надёжности подшипниковых узлов электрических машин. Здесь с учётом различных причин отказов надёжность оценивается вероятностью безотказной работы также с помощью распределения Вейбулла в виде

$$P(t) = \exp \left[- \left(\frac{t-a}{b} \right)^k \right] \text{ при } t > a; \quad (24)$$

$$P(t) = 1 \text{ при } t \leq a, \quad (25)$$

где параметр сдвига “ a ” характеризует зону, в которой вероятность отказа практически равна нулю. В некоторых случаях при отсутствии случайных повреждений показатель k оказывается весьма близким к единице, что соответствует постоянству интенсивности отказов.

Параметры a , b и k могут быть найдены опытным путём. Наиболее простые их оценки разработаны Институтом математики им. Стеклова и имеют вид

$$\bar{a} = \frac{1}{n-1} \cdot (n \cdot T_{cp} - T_p), \quad (26)$$

$$\bar{b} = \frac{n}{n-1} \cdot (T_p - T_{cp}), \quad (27)$$

где n – объём выборки; T_{cp} – наработка до первого отказа; T_p – средний ресурс; k – параметр гамма-функции $\Gamma(1/k) = T_p/\bar{b}$.

Пример 4.2. Отказы электрической машины малой мощности с подшипниками качения подчиняются распределению Вейбулла с параметрами $k = 1,5$ и $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Определить вероятность безотказной работы такой машины для промежутка времени 2000 ч., а также её среднюю наработку до первого отказа.

Решение

В соответствии с указанным распределением вероятность безотказной работы определяется по уравнению

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 \cdot t^k) = \exp(-2 \cdot 10^{-6} \cdot 2000^{1,5}) = e^{-0,179} \approx 0,84.$$

Средняя наработка до первого отказа

$$T_{cp} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}} = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{1,5} + 1\right)}{(2 \cdot 10^{-6})^{\frac{1}{1,5}}} = \frac{\Gamma(1,67)}{1,59 \cdot 10^{-4}} = 5700 \text{ ч},$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Пример 4.3. По результатам испытаний шарикоподшипников из партии $n = 100$ штук получены следующие данные: средняя наработка до первого отказа $T_{cp} = 12120$ ч., а средний ресурс $T_p = 21880$ ч. Определить вероятность безотказной работы шарикоподшипников $P(t)$ в течение времени $t = 15000$ ч.

Решение

Отказ подшипника может наступить как вследствие износа, так и в результате случайных повреждений. С учётом различных причин отказа его вероятность безотказной работы выражается с помощью распределения Вейбулла (24), а параметры распределения по формулам (26) и (27), считая $k \approx 1$, тогда

$$\bar{a} = \frac{1}{n-1} \cdot (n \cdot T_{cp} - T_p) = (100 \cdot 12120 - 21880)/(100 - 1) = 11920 \text{ ч.}$$

$$\bar{b} = \frac{n}{n-1} \cdot (T_p - T_{cp}) = 100 \cdot (21880 - 12120)/(100 - 1) = 9800 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы подшипника будет равна

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-a}{b}\right)^k\right] = \exp[-(15000 - 11920)/9800] = e^{-0,314} = 0,735.$$

4.3. Учёт влияния технологических и эксплуатационных факторов на показатели надёжности

Достоверное определение количественных показателей надёжности подшипниковых узлов невозможно без учёта влияния на них технологических и эксплуатационных факторов.

Для удобства анализа эти факторы могут быть представлены в виде следующих трёх групп.

А. Факторы, определяемые технологией изготовления деталей и узлов самой электрической машины, управление которыми возможно путём регулирования технологического процесса по результатам его контроля. Сюда относятся: диаметр цапф под подшипник, класс их обработки, статический и динамический эксцентриситеты, величина воздушного зазора, овальность колец подшипниковых щитов и цапф, перекос колец, биение колец и цапф.

Б. Факторы, определяемые качеством собственно подшипника и технологией сборки электрической машины в целом, непосредственный контроль которых невозможен в существующем технологическом процессе. К таким факторам следует отнести: номинальный радиальный зазор подшипника, внутренний диаметр кольца подшипника, радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец, гранность и волнистость дорожек и тел качения, шероховатость дорожек качения, вязкость смазки.

В. Факторы, возникающие в эксплуатации: коэффициент нагрузки, тип передачи, зазоры в приводе, характер нагрузки, температура смазки.

Единственным путём уточнения прогноза надёжности в этих условиях является уменьшение рассеяния (разброса) факторов, её определяющих, поскольку все они являются событиями случайными.

Долевое влияние j -й группы факторов на долговечность определяется соотношением

$$k_j = \sigma_j / \sigma, \quad (28)$$

где σ_j – среднеквадратическое отклонение долговечности, обусловленное фактором j -ой группы; σ – суммарное среднеквадратическое отклонение.

Для определения рассеяния σ можно воспользоваться методом линеаризации, позволяющим определить рассеяние функции нескольких случайных величин. В соответствии с этим методом среднеквадратическое отклонение искомой функции n случайных переменных определяется как

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i^2 \cdot \sigma_i^2)}, \quad (29)$$

где c_i – коэффициент влияния отклонений i -го фактора на отклонение функции; σ_i – среднеквадратическое отклонение i -го фактора.

Коэффициент влияния определяется в виде

$$c_i = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}. \quad (30)$$

Таким образом, для аналитического определения коэффициента влияния необходимо наличие (знание) функциональной зависимости между входными факторами и показателями надёжности.

В частном случае, например для уточнения значения T_p , можно воспользоваться известным уравнением, дополнив его соответствующими коэффициентами, учитывающими эксплуатационные факторы:

$$T'_p = k_\lambda \cdot k_t \cdot k_Q \cdot k_c \cdot T_p. \quad (31)$$

Либо воспользоваться оценкой среднеквадратического отклонения T_p под влиянием указанных факторов в виде

$$T_p = T_p \pm \sigma. \quad (32)$$

Статистические характеристики величин, входящих в уравнение для номинальной долговечности, могут быть оценены либо по справочным данным на подшипники (среднеквадратическое отклонение динамической грузоподъёмности – σ_c или динамической нагрузки – σ_Q), либо получены путём статистической обработки экспериментальных данных (среднеквадратическое отклонение температуры – σ_t и параметров смазочной плёнки – σ_λ).

Тогда для рассматриваемой группы факторов рассеяние долговечности подшипника может быть найдено в виде

$$\sigma = \sqrt{c_c^2 \cdot \sigma_c^2 + c_t^2 \cdot \sigma_t^2 + c_Q^2 \cdot \sigma_Q^2 + c_\lambda^2 \cdot \sigma_\lambda^2}, \quad (33)$$

где c_c , c_t , c_Q , c_λ – соответственно коэффициенты влияния, отклонения, динамической грузоподъёмности, температуры, приведённой нагрузки и параметров смазочной плёнки на отклонение долговечности подшипника.

Расчёты, проведённые по уравнениям, аналогичным рассмотренным выше, показывают, что основная доля рассеяния долговечности подшипника (примерно 60%) определяется условиями эксплуатации. На втором месте идут факторы, определяемые качеством самого подшипника, и только затем факторы, определяемые технологией изготовления её деталей и узлов.

4.4. Оценка долговечности подшипников качения с учётом состояния смазки

Многочисленные исследования показывают, что расчёт долговечности подшипников качения без учёта особенностей работы смазки зачастую приводит к значительным погрешностям.

Для оценки этого фактора в качестве основного параметра, несущего комплексную информацию о работе подшипника как с жидкими, так и с пластичными смазками принимается число Рейнольдса

$$R_e = \frac{\rho \cdot n \cdot d_0^2}{\mu}, \quad (34)$$

где n – скорость вращения внутреннего кольца подшипника, об/с; ρ – плотность смазки, кг/м³; $d_0 = (D_H - D_{BH})/2$ – средний диаметр подшипника, м; μ – динамическая вязкость смазки, Па·с.

На основании экспериментальных данных для подшипников, смазываемых маслами, получена следующая зависимость:

$$\frac{T^*}{T_p} = a_0 \cdot \lambda^{a_\lambda} \cdot R_e^{a_{R_e}}, \quad (35)$$

где λ – параметр смазки; T_p – расчётная долговечность подшипника, час; T^* – её опытное значение с учётом особенностей работы смазки.

В результате статистической обработки опытных данных уравнение для любой жидкой смазки может быть представлено в таком виде:

$$\frac{T^*}{T_p} \approx 0,41 \cdot R_e^{0,56} \cdot \lambda^{0,78}. \quad (36)$$

Для подшипников с пластичными смазками

$$\frac{T^*}{T_p} = a_0 \cdot \lambda^{a_\lambda} \cdot R_e^{a_{R_e}} \cdot \Delta^{a_\Delta}, \quad (37)$$

где $\Delta = 2\delta_{cp}/\delta_0$ – параметр среднего радиального зазора в подшипнике после его посадки на вал; $\delta_0 = (\delta_{max} + \delta_{min})/2$; δ_{cp} – то же самое, но после посадки подшипника на вал (в подшипниковые щиты).

Как показывают исследования, уравнение (37) не может быть представлено в универсальном виде, так как входящие в него параметры существенно зависят от типа смазки.

5. НАДЁЖНОСТЬ УЗЛОВ СО СКОЛЬЗЯЩИМИ КОНТАКТАМИ

5.1. Особенности условий работы коллекторно-щеточного узла, критерии работоспособности и отказа

Работоспособность и долговечность коллекторного узла определяется воздействием трёх групп основных факторов, связанных с электромагнитными процессами, механическими воздействиями и физико-химической природой скользящего контакта.

К факторам *электромагнитного* характера относятся электромагнитные нагрузки, напряжения между смежными пластинами, реактивная ЭДС, токовые перегрузки и др.

Факторы *механического* воздействия определяются технологическими и конструктивными особенностями машины (ослабление прессовки, эксцентриситет и эллиптичность коллектора, уровень вибрации всей машины или агрегата, частота вращения ротора).

Факторы *физико-химической* природы скользящего контакта определяются условиями токосъёма и состоянием окружающей среды (износ щёток и коллектора, нажатие на щётку, материал коллектора, температура, влажность, кислотность и запылённость окружающей среды). Следует упомянуть об образовании контактной плёнки (политуры) на поверхности коллектора. Влага, наличие в среде активных газов и особенно запылённость оказывают разрушающее воздействие на материал коллектора. Кроме того, большое число повреждений коллекторов вызывается трением щёток о коллектор и высокими плотностями токов под щётками при их неплотном прилегании к коллектору, что сопровождается значительным повышением температуры (местный перегрев отдельных участков). В результате этого наступает термическая ионизация щеточных контактов. Размыкание и замыкание контактных точек на поверхности коллектора с образованием малых электрических дуг приводят к разрушению поверхности коллектора.

Наиболее эффективными средствами уменьшения износа коллектора являются: улучшение условий коммутации машины путём правильной её настройки, подбор марки и размера щёток для данной мощности и напряжения машины, снижение окружной скорости коллектора, выбор оптимального давления щётки, тщательная балансировка якоря.

Совместный анализ перечисленных выше факторов, а также статистических данных, получаемых в результате испытаний, экспериментов и эксплуатации машин, позволяет решать задачу создания математической модели надёжности коллекторно-щеточного узла.

При построении математических моделей надёжности коллекторно-щеточного узла, а также при проверке их адекватности важнейшим этапом являются испытания на надёжность.

Оценка состояния узла при испытаниях на надёжность производится с помощью *критериев работоспособности и отказа*.

К ним относятся: искрение, биение, износ щёток, износ и температура коллектора, переходное сопротивление щёточного контакта, падение напряжения в щёточном контакте, величина небалансной ЭДС в секциях, замыкаемых щёткой.

Многочисленные исследования позволяют сделать вывод, что наиболее общим (интегральным) критерием оценки качества коммутации, а следовательно, качества работы коллекторно-щёточного узла являются среднеквадратическое отклонение перепадов уровней коллекторных пластин и уровень искрения (на практике – *биение и искрение*).

Если первый критерий в основном отражает причины механического характера, то второй является наиболее общим, так как включает в себя все три вида рассмотренных выше факторов, обуславливающих коммутационный процесс. Именно поэтому критерием качества коммутации в соответствии с ГОСТ 183–74 является её оценка по уровню качества.

5.2. Расчёт надёжности щёток

Коллекторно-щёточный узел конструктивно представляет собой одну из ответственных и сложных частей машины, которая объединяет коллектор и щёточный аппарат в единое устройство.

Щёточный аппарат относится к той части машины, которая во время работы характеризуется принципиально *износowymi* отказами за счёт постепенного истирания (износа) щёток.

Таким образом, электрощётка является невосстанавливаемым элементом конструкции. Её надёжность оценивается вероятностью безотказной работы за время t , в течение которого происходит её износ до предельно допустимой (минимальной) величины (высоты) $h_{\text{пр}}$. В связи с этим отказ щётки наступает, когда

$$h_t \leq h_{\text{пр}}, \quad (38)$$

где h_t – высота щётки, проработавшей в течение времени t , мм.

Износ щёток разных марок зависит от величины окружной скорости коллектора, давления щёток на коллектор и условий эксплуатации. Перечисленные факторы являются случайными событиями, а поэтому и скорость износа щёток $v_{\text{щ}}$ является случайной величиной.

Время безотказной работы щётки составляет, ч

$$t = \frac{h - h_{\text{пр}}}{v_{\text{щ}}}, \quad (39)$$

где h – начальная высота щётки, мм; $v_{\text{щ}}$ – скорость её износа, мм/час.

Опыт эксплуатации показывает, что распределение скорости износа щёток во времени приближается к нормальному закону. Поэтому средняя скорость износа определяется как

$$\bar{v}_{\text{щ}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_{\text{щ}i}, \quad (40)$$

а среднеквадратическое отклонение этой скорости равно

$$\bar{\sigma}_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{\text{ш}i} - \bar{v}_{\text{ш}})^2}, \quad (41)$$

где n – объём выборки щёток для испытаний.

Вероятность безотказной работы щётки в интервале времени t

$$P_{\text{ш}}(t) = 1 - Q_{\text{ш}}(t), \quad (42)$$

где вероятность её отказа в этом интервале, считая закон распределения отказов нормальным, определяется как

$$Q_{\text{ш}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sigma_{\text{ш}} \sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx, \quad (43)$$

где $x = |t_i - \bar{T}| / \sigma_{\text{ш}}$.

При этом среднее статистическое значение времени отказов щёток

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i, \quad (44)$$

а среднеквадратическое отклонение отрезков времени

$$\sigma_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T})^2}, \quad (45)$$

где t_i – время отказа i -й щётки.

Таким образом, $Q_{\text{ш}} = \frac{1}{2} + \Phi_1\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma_{\text{ш}}}\right)$, где $\Phi_1\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma_{\text{ш}}}\right)$ – нормированная функция Лапласа вида $\Phi_1(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$, определяемая из таблиц.

Рассмотренная методика оценки надёжности щёток основана на использовании статистических данных испытаний на надёжность выборки щёток объёмом n .

Пример 5.1. При испытании партии электродвигателей постоянного тока малой мощности среднее время отказа по причине срабатывания щёток составило $\bar{T} = 436$ ч, а среднеквадратическое его отклонение – $\sigma_{\text{ш}} = 120$ ч. Оценить вероятность отказа двигателя $Q(t)$ в течение времени $t = 400$ ч, считая, что отказы происходят по причине срабатывания щёток.

Решение

Для данного примера износ щёток подчиняется нормальному закону распределения, для которого центрированная и нормированная функция

$$\text{Лапласа } \Phi_1\left(\frac{t_i - \bar{T}}{\sigma_{\text{ш}}}\right) = \Phi_1\left(\frac{400 - 436}{120}\right) = \Phi_1(-0,3) = -0,1179 \text{ находится по}$$

таблице П.VI.2 см. [2]. Следовательно, вероятность безотказной работы щётки на заданном интервале времени $\Delta t = 120$ ч согласно формуле (42)

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - (1/2 - 0,1179) = 0,618.$$

5.3. Расчёт надёжности щёточного аппарата

Надёжность коллекторно–щёточного узла во многих случаях может быть определена как вероятность безотказной работы щёточного аппарата

$$P_{\text{к-щ у}}(t) \approx P_{\text{щ а}}(t). \quad (46)$$

Расчёт надёжности щёточного аппарата базируется на использовании кривой вероятности безотказной работы $P_{\text{щ}}(t)$ для генеральной совокупности данной марки щёток.

На практике обычно располагают только статистической оценкой этой характеристики и областью её доверительных значений. Щёточный аппарат при данном расчёте рассматривают как некоторую резервированную систему с дробным коэффициентом резервирования, определяемым опытным путём по уравнению

$$k_p = \frac{N}{N - n}, \quad (47)$$

где N – общее число щёток в машине; n – допустимое число отказов щёток, не приводящее к отказу машины (определяется путём испытаний).

Комплект из N щёток в машине можно рассматривать как выборку объёмом N из большой генеральной совокупности, характеризуемой кривой надёжности $P_{\text{щ}}(t)$. Для некоторого выбранного момента времени t_i по исходной кривой надёжности определяют вероятность безотказной работы щётки и вероятность её отказа:

$$Q_{\text{щ}}(t) = 1 - P_{\text{щ}}(t_i). \quad (48)$$

Таким образом, если допустимое число отказов щёток в комплекте равно n , то вероятность события (а значит, и вероятность безотказной работы щёточного аппарата), что при N испытаниях встретится не более n отказов, определяется в соответствии с формулой Бернулли

$$P_{\text{щ а}}(t) = \sum_{k=0}^n \binom{k}{N} \cdot P_{\text{щ}}(t)^{N-k} \cdot [1 - P_{\text{щ}}(t)]^k, \quad (49)$$

где $\binom{k}{N} = \frac{N!}{k!(N-k)!}$ – число сочетаний из N элементов по k .

Пример 5.2. Определить вероятность безотказной работы для отдельной щётки $P_{\text{щ}}(t)$ и щёточного аппарата $P_{\text{щ а}}(t)$, если задано $N = 4$, $n = 2$, $\bar{T} = 10000$ ч, $\sigma_t = 3000$ ч.

Решение

Принимаем время $t = 10000$ ч, тогда

$$P_{\text{щ}}(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - \bar{T}}{\sigma_t}\right) = 0,5 - \Phi\left(\frac{10000 - 10000}{3000}\right) = 0,5 - \Phi(0) = 0,5 - 0 = 0,5.$$

$$P_{\text{щ а}}(t) = \sum_{k=0}^n \binom{k}{N} \cdot P_{\text{щ}}(t)^{N-k} \cdot [1 - P_{\text{щ}}(t)]^k = \sum_{k=0}^2 \binom{2}{4} \cdot P_{\text{щ}}(t)^{4-2} \cdot [1 - P_{\text{щ}}(t)]^2 = 0,5^4 + \frac{4!}{1!(4-1)!} \cdot 0,5 \cdot 0,5^3 + \frac{4!}{2!(4-2)!} \cdot 0,5^2 \cdot 0,5^2 = 0,7.$$

5.4. Надёжность коллектора

В некоторых случаях надёжность коллекторно–щёточного узла определяется только износом коллектора, в частности – в случае его электроискрового износа.

Уровень искрения оценивается длительностью горения искровых разрядов (τ_j , мкс) между щёткой и коллекторной пластиной.

Наработка на отказ в этом случае определяется временем работы машины до момента прогорания ламелей на один паз по всей ширине (прогорание на толщину изоляционного промежутка между ламелями).

Считая, что скорость износа (α , мм/ч) пропорциональна числу искровых разрядов в единицу времени (скорости вращения якоря n , об/мин), обратно пропорциональна суммарной длине сбегавшего края щёток ($l_{щ}$, см) из одного brackets вдоль оси коллектора и запасу энергии в дуге пропорциональной индуктивности разрывающегося контура (L_p , Гн), можно записать:

$$\alpha \approx 8,73 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{n}{l_{щ} \cdot L_p} \cdot \tau_j^2. \quad (50)$$

Как видно, на скорость износа коллектора влияет большое количество факторов, разнородных по своей природе, а поэтому случайных. Следовательно, закон распределения скорости износа коллектора можно считать нормальным.

Используя закон нормального распределения величины износа, определяют вероятность безотказной работы коллектора в функции времени и уровня искрения по аналогии с расчётом вероятности безотказной работы щётки.

5.5. Надёжность контактных колец

Характерным отказом для контактных колец является образование под действием нагрева пятен на их рабочей поверхности, состоящих из окислов металла колец. Это приводит к повышенному износу контактных колец, местному искрению и преждевременному выходу из строя контактного узла, требующего после этого проточки и шлифовки колец.

Важным показателем работы контактного узла является перегрев контактных колец, допустимый уровень которого зависит от материала колец. Так, при выполнении контактных колец из медь–серебра и стали 1Х18Н9Т их перегрев ограничивается величиной 180АС, при превышении которого кольца подвергаются окислению. При использовании медь–кадмия, меди М1 и БрАЖ–МЦ или латуни их перегрев не должен превышать соответственно 130, 100 и 80°С из-за склонности к эрозии, окислению и полярному эффекту (величина переходного напряжения на отрицательном кольце в 5 раз больше, чем на положительном).

При нормальном состоянии поверхности контактных колец и номинальном давлении на щётку заметного искрения в переходном контакте

не наблюдается. Искрение возникает, как правило, в случае аварийного состояния контактных колец (нарушено крепление щёток, значительная выработка подшипников, приводящая к эксцентрическому вращению колец, неудовлетворительное нажатие щёток, загрязнение контакта и др.), и поэтому уровень искрения более одного балла уже может быть принят как критерий отказа контактного узла.

Температура контактных колец также является критерием отказа. Превышение температуры выше допустимых значений свидетельствует об отказе контактного узла. Измерение температуры осуществляется обычно потенциометрическим способом.

Целесообразно также за критерий работоспособности токосъёма контактных колец взять суммарную площадь окислов, появляющихся на контактных кольцах как плюсовой, так и минусовой полярностей. Этот критерий наилучшим образом оценивает физико-химические явления в переходном контакте. Методы измерения площади пятен окислов несложны и не нуждаются в специальном пояснении.

Пример 5.3. Определить конструкционную надёжность машины постоянного тока для промежутка времени $t = 1000$ ч, если среднестатистические данные об интенсивности отказов её основных узлов следующие: обмотка якоря – $\lambda_{\text{обм}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, подшипниковые узлы – $\lambda_{\text{п}} = 0,4 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, щёточный аппарат – $\lambda_{\text{ща}} = 1 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, магнитная система – $\lambda_{\text{мс}} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, коллектор – $\lambda_{\text{к}} = 3 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Решение

Когда надёжность отдельных элементов (составных частей) какого-либо устройства изменяется во времени по экспоненциальному закону, уравнение для вероятности безотказной работы системы имеет вид

$$P(t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \dots \cdot \exp(-\lambda_i t) = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i) \cdot t] = \exp(-\lambda t),$$

где λ_i – интенсивность отказов отдельных составных частей.

В рассматриваемом случае

$$\lambda = \lambda_{\text{обм}} + \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{ща}} + \lambda_{\text{мс}} + \lambda_{\text{к}} = (0,5 + 0,4 + 1 + 0,1 + 3) \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Средняя наработка на отказ

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda = 1/5 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^5 \text{ ч.}$$

Вероятность безотказной работы машины постоянного тока

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{T_{\text{ср}}}\right) = \exp\left(-\frac{10^3}{2 \cdot 10^5}\right) = e^{-0,005} = 0,995.$$

6. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА НАДЁЖНОСТЬ

6.1. Определение количества образцов для испытаний, виды испытаний

Испытания на надёжность различных технических устройств проводятся для *определения* или *подтверждения* уровня их надёжности.

Надёжность проработавших некоторое время устройств характеризуется вероятностью появления внезапных и износowych отказов, которые имеют различные законы распределения во времени: первые – экспоненциальный, а вторые – нормальный.

Для оценки внезапных отказов представляет интерес среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$. Тогда надёжность устройства в течение времени t может быть определена по экспоненциальному уравнению

$$P(t) = \exp(-t/T_{\text{ср}}). \quad (51)$$

Однако истинное значение вероятности безотказной работы устройства точно не известно, но близкие к нему значения можно получить в результате большого числа опытов.

В целях оценки $T_{\text{ср}}$ можно подвергнуть испытаниям n однотипных изделий. Если во время испытаний отказало r изделий и испытания прекратились к моменту времени t_r наступления r -го отказа, то

$$T_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n-r) \cdot t_r}{r}, \quad (52)$$

где $\sum_{i=1}^r t_i$ – суммарная наработка отказавших изделий; t_r – момент времени окончания при отказе r -го изделия.

Оценка среднего времени безотказной работы по приведённому уравнению представляет собой так называемую точечную оценку истинного неизвестного параметра. Статистические оценки приближаются к истинным по мере увеличения объёма выборки. Таким образом, объём выборки зависит от времени испытаний и требуемой точности (достоверности) результатов.

Пример 6.1. Ожидаемая интенсивность внезапных отказов для партии двигателей составляет $\lambda = 40 \cdot 10^{-6}$ 1/час, т.е. $T_{\text{ср}} = 1/\lambda = 2,5 \cdot 10^4$ час. Желательно проведение испытаний на надёжность до появления $r = 4$ отказов. Какое количество двигателей надо подвергнуть испытаниям, если испытания проводятся в течение $t_r = 1000$ час ?

Решение

В этом случае по определению вероятность отказа на интервале времени $(0 \dots t_r)$ составит

$$\frac{r}{n} = 1 - P(t_r) = 1 - e^{-t_r/T_{\text{ср}}} = 1 - \exp\left(-\frac{1000}{2,5 \cdot 10^4}\right) = 0,04.$$

Отсюда объём выборки $n = 4/0,04 = 100$.

Следовательно, в общем случае число образцов, которые нужно подвергнуть испытаниям на надёжность в течение времени t для оценки среднего времени безотказной работы, определяется как

$$n = \frac{r}{1 - e^{-\lambda t}}, \quad (53)$$

где λ – ожидаемая средняя интенсивность внезапных отказов; r – запланированное число отказов в течение времени t .

При оценке износных отказов можно пользоваться значительно меньшим объёмом выборки изделий, чем при оценке интенсивности внезапных отказов. Однако время испытаний здесь существенно больше, так как период изделия наступает после длительного периода его нормальной эксплуатации.

Испытания технических устройств на надёжность делят: на *определятельные* и *контрольные*.

Определятельные испытания на надёжность изделий, серийное производство которых налажено вновь или после модернизации, проводятся с целью *определения* фактических показателей надёжности. При этом могут оцениваться законы распределения отказов и их параметры.

Контрольные испытания проводят для *подтверждения* соответствия показателей надёжности требованиям стандартов или технических условий.

Испытания обычно проводят методом однократной выборки изделий из партии и сводятся к контролю вероятности безотказной работы за время, указанное в стандарте – для экспоненциального закона распределения отказов или за время, равное наработке на отказ – для нормального закона.

Поскольку испытания проводятся выборочно, то при принятии решения возможны два вида ошибок: бракуется хорошая партия или принимается плохая партия. Вероятность первой ошибки называется *риском изготовителя*, а вероятность второй – *риском заказчика* или *потребителя*.

Методы контрольных испытаний изложены в ГОСТ 27.410–83 «Надёжность в технике. Методы и планы статистического контроля показателей надёжности по альтернативному признаку».

Методика испытаний в общем случае должна содержать перечень показателей надёжности, подлежащих контролю, а также по каждому конкретному показателю надёжности следующие данные: приёмочный P_α и браковочный P_β уровни вероятности безотказной работы, риски заказчика и изготовителя, метод проведения испытаний, план испытаний, перечень параметров, характеризующих состояние изделия, условия испытаний (значения воздействующих факторов, их последовательность, продолжительность и т.п.) и решающее правило.

Допускается использование упрощённого плана. В этом случае исходными данными являются: число допустимых отказов, C – приёмочное число; вероятность безотказной работы P_β и риск заказчика β . Число C выбирается небольшим ($0 \dots 2$), чтобы не увеличивать объём выборки n , который в соответствии с указанным ГОСТом, например, для экспоненциального закона распределения отказов выбирается как

$$n = \frac{C}{2} + \frac{a(1 + P_{\beta})}{2(1 - P_{\beta})}, \quad (54)$$

где a – параметр распределения Пуассона.

В результате испытаний число отказов d должно быть не больше приёмочного числа C , т.е.

$$d \leq C, \quad (55)$$

что и является решающим правилом.

Метод однократной выборки состоит в том, что оценку результатов испытаний производят на основании испытаний определённого и заранее рассчитанного объёма выборки.

Объём выборки n может быть рассчитан по методике, изложенной в соответствующем стандарте, либо взят из соответствующих таблиц того же стандарта.

Испытания должны проводиться с определённой, так называемой *доверительной вероятностью* α – вероятностью того, что истинное значение величины попадает в данный интервал, и числом отказов c .

Например, для доверительной вероятности $\alpha = 0,8$ объём выборки и число отказов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Объём выборки и число отказов

Число отказов c	Вероятность безотказной работы P при объёме выборки n			
	0,99	0,96	0,9	0,8
0	159	39	15	7
1	299	74	29	14
2	427	104	42	20
3	551	138	54	26

Пример 6.2. При проведении испытаний на надёжность 20 однотипных изделий отказало 5. Отказы имели место при $t_1 = 850$ ч, $t_2 = 1020$ ч, $t_3 = 1100$ ч, $t_4 = 1200$ ч, $t_5 = 1400$ ч. К моменту наступления последнего отказа испытания были прекращены. Определить среднее время безотказной работы.

Решение

При оценке внезапных отказов представляет интерес среднее время безотказной работы. Для условий данной задачи этот параметр может быть найден из следующего уравнения:

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i + (n - r) \cdot t_r}{r} = \frac{(850 + 1020 + 1100 + 1200 + 1400) - (20 - 5) \cdot 1400}{5} = 5114 \text{ ч.}$$

Пример 6.3. Ожидаемая средняя интенсивность внезапных отказов составляет $1 \cdot 10^{-5}$ 1/ч. Планируется проведение испытаний на надёжность до появления 5 отказов. Какое количество изделий требуется поставить на испытание, если его продолжительность составляет 5000 ч ?

Решение

Оценка среднего времени безотказной работы, полученная в предыдущем примере, представляет собой «точечную» оценку истинного значения неизвестного параметра.

Статистические оценки приближаются к истинным по мере увеличения объёма выборки. Величина выборки может быть найдена из следующих соображений.

Поскольку вероятность отказов определяется как $r/n = 1 - \exp(-t_r/T_{cp})$, то объём выборки должен быть равен

$$n = \frac{r}{1 - \exp(-t_r / T_{cp})} = \frac{5}{1 - e^{-0,05}} = 100 \text{ шт.}$$

Пример 6.4. При испытании на надёжность 11 однотипных изделий до выхода их из строя получены следующие наработки (в часах): $t_1 = 300$, $t_2 = 400$, $t_3 = 600$, $t_4 = 700$, $t_5 = 1000$, $t_6 = 1500$, $t_7 = 2000$, $t_8 = 2500$, $t_9 = 3000$, $t_{10} = 3500$, $t_{11} = 4000$. Определить среднюю наработку на отказ и её границы с вероятностью 0,95.

Решение

Основными понятиями, которыми приходится оперировать при анализе статистических данных о надёжности, являются «доверительный уровень» и «коэффициент доверия». В соответствии с этим данные испытаний следует представлять не в виде точечных оценок, а с помощью некоторого интервала с заданной *доверительной вероятностью* или *коэффициентом доверия*. Последний выражает собой вероятность того, что *истинное* значение определяемого параметра находится внутри определённого *интервала*. Границы такого интервала называются *доверительными*. Доверительные интервалы статистических оценок параметров надёжности имеют *верхнюю* и *нижнюю* границы.

Например, если вычисляют доверительные границы для вероятности безотказной работы порядка 0,9, то это означает, что в 90% случаев истинное значение этого параметра будет находиться в пределах вычисленных границ.

В случае экспоненциального закона распределения отказов для определения нижней и верхней границ интенсивности отказов пользуются таблицей квантилей χ^2 -распределения, в которой параметрами являются вероятность P и число степеней свободы $\nu = 2 \cdot n$, где n – число испытываемых образцов изделия.

Для рассматриваемого примера суммарная наработка изделий составляет

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{11} t_n = 22000 \text{ ч.}$$

Интенсивность их отказа

$$\bar{\lambda}(t) = n/t_{\Sigma} = 11/22000 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч.}$$

Для поиска нижней и верхней границ интенсивности отказов принимаем доверительную вероятность $\alpha_n = \alpha_b = 0,95$. Обычно величина доверительной вероятности принимается равной 0,9; 0,95; 0,99.

По таблице квантилей χ^2 -распределения при принятой доверительной вероятности и заданном числе испытываемых изделий, например по табл. П–1 [3] имеем $\chi^2_{(0,05)(2 \cdot 11)} = 12,3$; $\chi^2_{(0,95)(2 \cdot 11)} = 33,9$.

Тогда нижняя и верхняя доверительные границы определяются как

$$\bar{\lambda}_n = \frac{\chi^2_{(0,05)(22)}}{2t_\Sigma} = \frac{12,3}{2 \cdot 22000} = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч,}$$

$$\bar{\lambda}_B = \frac{\chi^2_{(0,95)(22)}}{2t_\Sigma} = \frac{33,9}{2 \cdot 22000} = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч.}$$

Оценка средней наработки на отказ и её границы

$$T_{\text{срн}} = 1/\bar{\lambda}_B = 1/7,7 \cdot 10^{-4} = 1298 \text{ ч,}$$

$$T_{\text{срв}} = 1/\bar{\lambda}_n = 1/2,8 \cdot 10^{-4} = 3571 \text{ ч,}$$

$$T_{\text{ср}} = 1/\bar{\lambda}_{\text{ср}} = (1/2) \cdot (2,8 + 7,7) \cdot 10^{-4} = 1905 \text{ ч.}$$

6.2. Статистическая обработка результатов испытаний

Для решения теоретических и практических задач надёжности необходимо знать законы распределения случайных величин. Обработка статистического материала позволяет определить законы распределения отказов.

При эксплуатации или испытании изделия случайная величина T в течение некоторого интервала времени t может принять n различных значений. Совокупность этих значений случайной величины называется *статистической выборкой* объёмом n .

При большом числе n удобнее от статистической выборки перейти к *статистическому ряду*. Для этого весь диапазон значений случайной величины T разбивается на интервалы. Подсчитав количество значений m_i случайной величины T , приходящихся на каждый i -й интервал, определяют частоту (частость) её попадания в данный интервал:

$$p_i^* = m_i/n. \quad (56)$$

В этом случае статистический ряд представляется в виде следующей таблицы

Таблица 4

Статистический ряд

Интервалы	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$...	$t_i - t_{i+1}$...	$t_k - t_{k+1}$
Частота	p_1^*	p_2^*	...	p_i^*	...	p_k^*

Величина интервала определяется как

$$\Delta t' = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{k'}, \quad (57)$$

где T_{max} и T_{min} – максимальное и минимальное значения T в сводке величин.

Для удобства рассчитанный интервал $\Delta t'$ округляется до целых десятков или сотен. Тогда число интервалов равно

$$k = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{\Delta t}. \quad (58)$$

При разбивке случайной величины число интервалов не должно быть слишком большим, чтобы в частотах p_i^* не обнаружились незакономерные её колебания. При малом же числе интервалов статистический ряд грубо описывает характер распределения. Поэтому целесообразно выбирать число интервалов порядка (10 ... 20). Однако при большом статистическом материале это число может быть увеличено.

Наглядное представление о законах распределения случайной величины дают статистические графики, например такой, как *гистограмма*.

Гистограмма строится следующим образом. На каждом отрезке оси абсцисс, изображающим интервал, строится прямоугольник, площадь которого пропорциональна частоте появления случайной величины в этом интервале. Если интервалы имеют одинаковую ширину, что обычно и бывает, то высоты прямоугольников пропорциональны частотам.

При увеличении числа опытов n для каждого интервала можно выбирать всё меньшую продолжительность. В этом случае гистограмма будет приближаться к некоторой плавной кривой. Следовательно, такая кривая соответствует графику функции плотности распределения некоторой случайной величины T .

6.3. Критерии согласия и доверительные интервалы

Под «выравниванием» статистического ряда подразумевается такая обработка статистических данных, при которой обеспечивается подбор наиболее подходящего теоретического закона распределения. При этом закон распределения может быть описан либо функцией распределения $F(t)$, либо плотностью распределения $f(t)$.

Для оценки степени расхождения полученного статистического распределения $F^*(t)$ с теоретическим законом распределения $F(t)$ выбирается такая мера расхождения, по величине которой можно было бы судить о том, вызвано ли это расхождение случайными причинами, либо разница между распределениями такова, что выбранный теоретический закон $F(t)$ непригоден.

При «выравнивании» статистического ряда обычно стремятся выбрать такую аппроксимирующую функцию $\varphi_0(t)$, которая в то же время действительно согласовывалась бы с данными эксперимента, т.е. чтобы можно было считать справедливым равенство

$$\varphi_0(t) \approx F(t). \quad (59)$$

Для оценки правдоподобия этого приближённого вероятностного равенства разработано несколько *критериев согласия* проверяемых гипотез относительно вида функций $\varphi_0(t)$ и $F(t)$.

Идея применения критериев согласия заключается в следующем. Предполагается, что случайная величина T , полученная в виде статистического ряда, подчинена некоторому определённом закону распределения, описываемому функцией распределения $F(t)$.

Для проверки справедливости такой гипотезы вводится вспомогательная величина Δ , которая может быть выбрана различными способами, но так чтобы она могла служить мерой расхождения между теоретическим и статистическим законами распределения.

Поскольку для разных опытов статистические данные носят случайный характер и функция $F^*(t)$ для каждого опыта будет иметь другой вид, то мера расхождения Δ является случайной величиной.

Если гипотеза о том, что величина T подчиняется закону распределения $F(t)$ справедлива, то закон распределения Δ будет определяться законом распределения T и числом опытов.

Это обстоятельство и позволяет установить согласие между теоретическим и статистическим распределениями, если известен закон распределения Δ .

Предположим, что закон распределения выбранной меры расхождения Δ известен.

В результате эксперимента установлено, что выбранная мера расхождения приняла некоторое конкретное значение u .

Для того, чтобы выяснить, является ли это расхождение случайным за счёт ограниченности числа опытов, или оно свидетельствует о наличии существенной разницы между теоретическим и статистическим распределениями, необходимо вычислить вероятность получения такого расхождения при принятом законе $F(t)$ и заданном n .

При известной функции Δ это вычисление сводится к определению события, что $\Delta \geq u$, т.е. $p\{\Delta \geq u\}$.

Если эта вероятность окажется малой, то теоретическое распределение выбрано неудачно. В этом случае гипотеза о том, что $F(t)$ «выравнивает» статистическое распределение $F^*(t)$, мало правдоподобна.

Если же вероятность значительна, то можно считать, что экспериментальные данные не противоречат сделанному допущению о подчинении случайной величины T закону распределения $F(t)$.

Оказывается, что при некоторых способах выбора меры расхождения Δ закон распределения этой величины может быть определён заранее теоретически, исходя из общих положений теории вероятностей, и при достаточно большом n не зависит от вида функции $F(t)$, что значительно облегчает применение критериев согласия.

Наиболее употребительными критериями согласия являются критерии Пирсона и А.Н.Колмогорова.

А. Критерий Пирсона. В качестве меры расхождения Δ для этого критерия выбрана величина, определяемая уравнением

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i}, \quad (60)$$

где n – общее число опытов; k – число интервалов статистического ряда; $p_i^* = m_i/n$ – частота i -го интервала статистического ряда; p_i – теоретическая вероятность попадания случайной величины в i -й интервал.

Оказывается, что при таком выборе меры расхождения Δ закон распределения её величины при увеличении k ($k \rightarrow \infty$) приближается к известному в теории вероятностей распределению χ^2 (хи-квадрат), а следовательно, не зависит от вида теоретической функции распределения и числа опытов, а определяется только числом разрядов (интервалов k) статистического ряда.

В силу сказанного при использовании критерия Пирсона мера расхождения Δ обычно обозначается как χ^2 .

Учитывая соотношение $p_i = m_i/n$, уравнение для χ^2 записывается в следующем виде:

$$\chi^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{m_i^2}{p_i} - n, \quad (61)$$

где m_i , n и k – известные по данным опыта, а теоретическая вероятность p_i вычисляется, исходя из принятого для «выравнивания» статистического ряда теоретического закона распределения $F(t)$, как вероятность попадания случайной величины в каждый из разрядов

$$p_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} F(t) dt. \quad (62)$$

Следовательно, для любого i -го интервала оказывается известным некоторое определённое значение $\chi^2 = \chi_i^2$.

Поскольку величина Δ известна – определяется в соответствии с уравнением (60), то оценка степени расхождения определяется как вероятность события $\Delta \geq \chi_i^2$, т.е. сводится к определению вероятности попадания случайной величины Δ на участок от χ_i^2 до $+\infty$:

$$p\{\chi_i^2 \leq \Delta \leq +\infty\} = \int_{\chi_i^2}^{\infty} k_r(u) du. \quad (63)$$

Интеграл, стоящий в правой части табулирован, а поэтому при известных значениях r , где $r = k - 1$ – число степеней свободы распределения, и χ_i^2 по таблицам может быть определена величина вероятности.

Если эта вероятность очень мала (практически меньше 0,1), то выбранное теоретическое распределение следует считать неудачным. При относительно большом значении вероятности выбранное теоретическое распределение можно признать не противоречащим опытным данным.

Критерий Пирсона применим в тех случаях, когда количество опытов достаточно велико (порядка сотен), а в каждом разряде число наблюдений m_i не менее пяти.

Б. Критерий А.Н.Колмогорова. Сущность критерия сводится к следующему. На график (см. рис. 4) наносят значения степенной функции распределения, соответствующей статистическим данным $F^*(x)$, и выбранной аппроксимирующей функции $F(x)$.

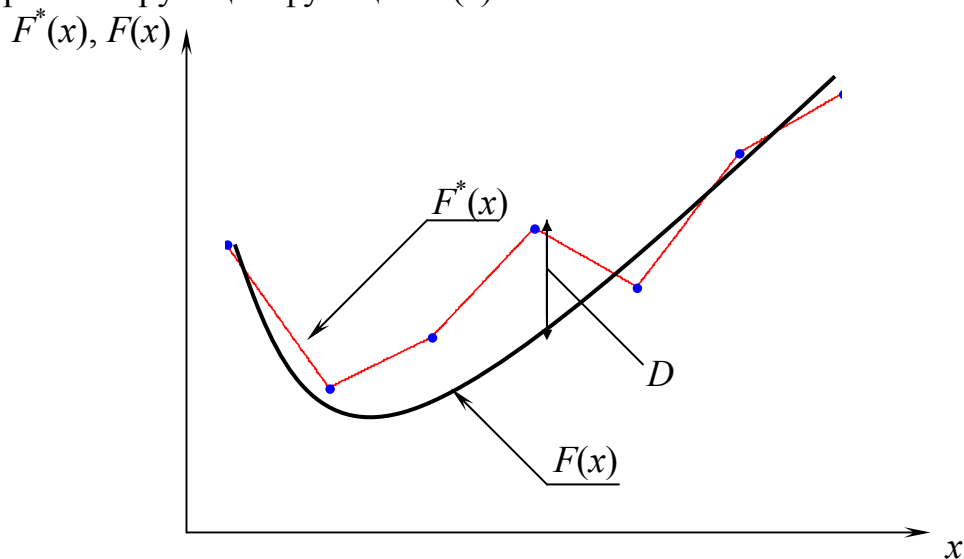


Рис. 4

В качестве меры расхождения между ними выбирается величина $D \cdot \sqrt{n}$, удовлетворяющая неравенству

$$\Delta = D \cdot \sqrt{n} \geq \lambda, \quad (64)$$

где n – объём статистической выборки; D – максимальное отклонение статистической функции распределения $F^*(x)$ от теоретической $F(x)$:

$$D = \max |F(x) - F^*(x)|. \quad (65)$$

Эта величина может быть найдена непосредственно из графика.

А.Н.Колмогоровым была доказана теорема, согласно которой для любой непрерывной функции при неограниченном возрастании числа опытов вероятность неравенства (64) стремится к пределу, определяемому рядом

$$1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp(-2k^2\lambda^2), \quad (66)$$

т.е.

$$\lim p\{D \cdot \sqrt{n} \geq \lambda\} = \lim [1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k \cdot \exp(-2k^2\lambda^2)] = p(\lambda), \quad (67)$$

где $p(\lambda)$ – табулированная функция.

Таблица 5

Значения функции $p(\lambda)$

Мера расхождения ($\lambda \rightarrow \Delta$)	0	0,2	0,8	1,2	1,6	2,0
Функция $p(\lambda)$	1	0,99	0,54	0,11	0,002	0,001

Если число испытаний достаточно велико, то можно считать, что

$$p\{D \cdot \sqrt{n} \geq \lambda\} \approx p(\lambda). \quad (68)$$

Вычислив $\lambda = D \cdot \sqrt{n}$, по табл. 5 определяют вероятность $p(\lambda)$. Если окажется, что $p(\lambda) \geq 0,25$, то функцию $F(x)$ принимают за рабочую гипотезу, если же $p(\lambda) < 0,25$, функцию $F(x)$ отвергают.

Для того, чтобы найти закон распределения любой случайной величины необходимо провести сравнительно большое число опытов.

На практике чаще всего приходится иметь дело со статистическим материалом весьма ограниченного объёма, который оказывается недостаточным для определения закона распределения случайной величины каковой является любая характеристика надёжности.

Однако такой материал может быть подвергнут определённой статистической обработке, позволяющей получить сведения о рассматриваемой случайной величине путём оценки её числовых характеристик.

Таким образом, значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, называется оценкой этого параметра.

Если в процессе экспериментальной проверки получен некоторый статистический ряд

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n, \quad (68)$$

то располагая им, можно найти некоторую величину m^* , являющуюся функцией этих n случайных реализаций x_i .

Величину m^* называют статистической оценкой действительной величины m , полагая при этом, что $m^* \approx m$.

Справедливость этого приближённого равенства будет тем более обоснованной, чем больше объём статистики n и чем лучше «подобрана» функция m^* .

Возможность применения, например, $T_{\text{ср}}^*$ для приближённого определения (оценки) среднего времени безотказной работы базируется на положении теории вероятностей, согласно которому среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины является состоятельной и несмещённой оценкой её математического ожидания.

Состоятельность оценки означает, что при увеличении числа опытов n она приближается к истинному значению.

Несмещённость оценки выражается в том, что при использовании среднего арифметического значения не делается систематической ошибки в сторону завышения или занижения.

Таким образом, использование в качестве оценки при ограниченном числе опытов величины $T_{\text{ср}}^*$ позволяет свести неизбежные ошибки при её определении к минимально возможным.

Следовательно, задача заключается в том, чтобы определить, насколько неизбежные ошибки влияют на точность и достоверность вычисленного значения действительной величины $T_{\text{ср}}$. Иными словами: если в качестве оценки параметра $T_{\text{ср}}$ принимается среднее арифметическое наблюдаемых

значений $T_{\text{ср}}^*$, то надлежит установить, с какой вероятностью можно утверждать, что допущенная при этом ошибка не превзойдёт некоторой наперёд заданной величины ε .

Следовательно, решение задачи сводится к нахождению вероятности того, что истинное неизвестное значение параметра $T_{\text{ср}}$ будет заключено в пределах

$$T_{\text{ср}}^* - \varepsilon \leq T_{\text{ср}} < T_{\text{ср}}^* + \varepsilon. \quad (70)$$

Обозначим эту вероятность через α , тогда

$$\alpha = p\{T_{\text{ср}}^* - \varepsilon \leq T_{\text{ср}} < T_{\text{ср}}^* + \varepsilon\} \leftrightarrow \alpha = \{|m^* - m| \leq \varepsilon\}. \quad (71)$$

Вероятность α называют *доверительной вероятностью* – это вероятность того, что ошибка от замены действительного параметра m его оценкой m^* не превышает по абсолютной величине некоторого произвольного числа ε .

Иными словами, α есть вероятность того, что случайный интервал

$$J_{\alpha}[(m^* - \varepsilon), (m^* + \varepsilon)] \quad (72)$$

«накрывает» точку m .

Интервал J_{α} , который с вероятностью α «накрывает» точку, называется *доверительным интервалом*, а его границы $m_1 = m^* - \varepsilon$ и $m_2 = m^* + \varepsilon$ называются *доверительными границами*.

Доверительный интервал характеризует *точность* получаемого результата, а доверительная *вероятность* – его *достоверность*.

7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. – М.: Энергия, 1976.
2. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001.
3. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надёжность электрических машин. – Л.: Энергия, 1976.
4. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надёжность электрических машин. – М.: Высшая школа, 1988.
5. Сотсков Б.С. Основы теории и расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Высшая школа, 1970.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абразивный износ 30
- Аналитическое прогнозирование 5
- Биение коллекторных пластин 38
- Вероятность отказа щёток 40
- Верхняя доверительная граница 46
- Дефект 6
- Дефектность 6
- Доверительная вероятность 45
- Доверительный интервал 46
- Износ изоляции 18
 - коллектора 41
 - контактных колец 41
 - щёток 38
- Изоляция корпусная 6
 - межвитковая 6
 - межсекционная 25
 - межфазовая 6
- Испытания на надёжность 43
 - — — контрольные 44
 - — — определительные 44
- Искрение коллекторных пластин 38
 - контактных колец 42
- Конструкционная надёжность 16
- Коэффициент доверия 46
- Критерий отказа 37
 - работоспособности 37
 - согласия А.Н.Колмогорова 49
 - — Пирсона 49
- Метод однократной выборки 45
- Нагревостойкость изоляции 19
- Несмещённость оценки 52
- Нижняя доверительная граница 46
- Объём выборки 44
- Оптимальные показатели 13
 - — безотказности 15
 - — долговечности 15
- Перегрев контактных колец 41
- Риск изготовителя 44
 - потребителя 44
- Состоятельность оценки 52
- Старение изоляции 18
- Статистическая выборка 47
- Статистический ряд 47
- Теплоустойчивость изоляции 19
- Точечная оценка 46
- Число Рейнольдса 35

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	5
1.1. Методы прогнозирования надёжности: их классификация и общая характеристика	5
1.2. Принципы математического моделирования надёжности, аналитическое прогнозирование	6
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	13
2.1. Особенности электрических машин как объектов оценки надёжности	13
2.2. Учёт вопросов надёжности при проектировании и производстве	16
3. НАДЁЖНОСТЬ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН	18
3.1. Закономерности старения изоляции, основные понятия и определения	18
3.2. Старение изоляции под действием температуры	19
3.3. Старение изоляции под действием электрического поля	21
3.4. Старение изоляции под действием механических нагрузок	23
3.5. Старение изоляции под действием влаги и химически активных веществ	24
3.6. Надёжность всыпных обмоток	25
3.7. Математическая модель надёжности пазовой изоляции	28
4. НАДЁЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ	30
4.1. Причины выхода из строя подшипниковых узлов	30
4.2. Расчёт надёжности подшипниковых узлов	31
4.3. Учёт влияния технологических и эксплуатационных факторов на показатели надёжности	33
4.4. Оценка долговечности подшипников качения с учётом состояния смазки	35
5. НАДЁЖНОСТЬ УЗЛОВ СО СКОЛЬЗЯЩИМИ КОНТАКТАМИ	37
5.1. Особенности условий работы коллекторно-щёточного узла, критерии работоспособности и отказа	37
5.2. Расчёт надёжности щёток	38
5.3. Расчёт надёжности щёточного аппарата	40
5.4. Надёжность коллектора	41
5.5. Надёжность контактных колец	41
6. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА НАДЁЖНОСТЬ	43
6.1. Определение количества образцов для испытаний, виды испытаний	43
6.2. Статистическая обработка результатов испытаний	47
6.3. Критерии согласия и доверительные интервалы	48

Воробьёв Виктор Евгеньевич
Кучер Валентин Яковлевич

Прогнозирование срока службы электрических машин

Письменные лекции

Редактор И.Н.Садчикова
Сводный темплан 2004 г.
Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03. от 21.11.03 г.

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16
Б. кн.-журн. Пл. 3,5. Б.л. 0,625. РТП РИО СЗТУ	
Тираж 50.	Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
РИО СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации вузов
Санкт-Петербурга
191186 Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5