

Лекция 10

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Проектирование надежности систем

Для ряда технических систем (некоторых видов техники, промышленных и жилых зданий, мостов, плотин и других сооружений) проблема обеспечения надежности при проектировании решается без непосредственного использования методов теории надежности, т.к.

установленные для них проектные нормы обеспечивают практическое отсутствие отказов в течение всего срока эксплуатации. Для таких систем (особенно уникальных изделий единичного изготовления) последствия отказов во много раз превосходят, как правило, затраты на изготовление и главным критерием оптимальности и основной задачей проектных исследований надежности является обеспечение максимальной гарантии безотказной работы в течение заданного срока.

Проектирование надежности систем

Эта задача чаще всего решается выбором максимальных коэффициентов запаса прочности и безопасности, которые и обеспечивают работу объектов при всех возможных разбросах воздействующих факторов, характеристик материалов и технологии изготовления.

Однако усложнение техники, ужесточение условий эксплуатации, использование новых материалов, комплектующих изделий, конструктивных решений и технологических процессов, ограничения по массе, габаритам, энергопотреблению и многие другие аналогичные факторы затрудняют использование такого детерминированного подхода к проектированию многих видов технических объектов.

Проектирование надежности систем

В большинстве случаев при проектировании становится оправданным *нормативный вероятностный подход*, при котором нормируется и обеспечивается требуемый экономически обоснованный уровень вероятностных показателей надежности, который затем контролируется специальными испытаниями на надежность и поддерживается с помощью системы технического обслуживания при эксплуатации.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Общий порядок проектирования технических объектов регламентирован стандартами по разработке и постановке изделий на производство. Однако вопросы отработки на надежность имеют ряд особенностей, которые выходят за рамки общетехнической системы стандартов.

Проектные исследования надежности включают разработку некоторых моделей, устанавливающих функционирование объекта на различных стадиях «жизненного цикла».

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Конкретное содержание каждого из этапов проектного исследования и, соответственно, моделей зависит от вида технического объекта, его сложности, массовости изготовления, организации проектных работ и т.д.

Стандартная последовательность решения задач проектного исследования надежности уже на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ включает задание требований по надежности, принятие обоснованных решений, обеспечивающих их выполнение и соответствующий контроль, предварительный выбор состава и определение надежности составных частей.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Задание требований по надежности формулируется в виде минимальных значений нормируемых показателей надежности, обеспечивающих требования эффективности, или в виде максимально достижимого значения показателя надежности при соблюдении заданных ограничений по затратам. На стадии принятия проектных решений определяются один или несколько вариантов проектных параметров, при которых выполняются требования по надежности, при минимальных затратах. Контроль выполнения требований по надежности должен предусматривать минимум «риска заказчика» при ограничении средств на контроль или минимум затрат на контроль при ограничении «риска заказчика».

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

При расчете надежности объекта на различных этапах проектирования в первую очередь необходимо определить (или хотя бы оценить) вероятность его безотказной работы и ее изменение во времени или от наработки.

Достоверность расчета надежности на всех этапах разработки объекта в первую очередь зависит от принятых допущений, выбора количественных показателей надежности элементов и их зависимостей от времени или наработки, полноты учета факторов, влияющих на надежность, правильности построения структурной схемы объекта, взаимного влияния элементов и их отказов друг на друга, влияния внешних факторов и т.д.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

При задании требований по надежности на стадии технического задания в общем случае определяются и согласовываются между заказчиком и разработчиком следующие основные вопросы:

- ✓ типовая модель эксплуатации или несколько возможных моделей (последовательность этапов и режимов эксплуатации, характеристики системы технического обслуживания и ремонта, уровни внешних воздействий и нагрузок, численность и квалификация обслуживающего персонала и др.);

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

- ✓ критерии отказов для каждой модели эксплуатации;
- ✓ критерии предельных состояний;
- ✓ критерии эффективности и понятие выходного эффекта изделия;
- ✓ номенклатура и значения показателей надежности;
- ✓ методы контроля соответствия изделий требованиям по надежности;
- ✓ требования и ограничения по способам обеспечения надежности:

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

- *конструктивным* - по видам и кратности резервирования, затратам при изготовлении и эксплуатации, массе, габаритам и объему, структуре, номенклатуре и составу ЗИП, комплектующих и материалов, системе технического диагностирования, применению стандартных и унифицированных изделий и т.д.;

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

- *технологическим* (производственным) - к точности технологического оборудования, стабильности технологических процессов, свойствам сырья и материалов, комплектующим изделиям, необходимости, длительности и режимам технологического прогона (обкатки), способам и средствам контроля надежности (дефектности) в ходе производства и т.д.;

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

- *эксплуатационным* - к системе технического обслуживания и ремонтов, к методам технического диагностирования или контроля технического состояния, к численности, квалификации и уровню подготовки обслуживающего и ремонтного персонала, к способам устранения отказов и повреждений, порядку использования ЗИП, правилам регулировок и т.п., к объему и форме представления информации о надежности, регистрируемой при эксплуатации и т.д.;
- ✓ необходимость разработки программы обеспечения надежности.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Номенклатура показателей надежности выбирается в соответствии с требованиями и рекомендациями стандартов, технических условий и других нормативных документов в зависимости от вида изделия, особенностей работоспособных и неработоспособных состояний, возможности восстановления после отказа и т.д.

Расчет надежности технической системы осуществляется по известным количественным характеристикам надежности ее элементов. Так как системами могут считаться технические объекты любой сложности, то элементами могут оказаться узлы, блоки и подсистемы также любой сложности.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Поэтому при проектировании и расчете надежности в рассмотрение вводится понятие «*элемента расчета надежности*», под которым понимается составная часть системы, имеющая количественные характеристики надежности, которые самостоятельно учитываются при расчете.

Расчет вероятности безотказной работы любого объекта в общем случае должен учитывать три вида отказов: внезапные, параметрические (постепенные) и перемежающиеся. Если отказы каждого вида считать независимыми событиями, то общая вероятность безотказной работы

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

$$P = P_a \times P_b \times P_c, \quad (10.1)$$

где P_a , P_b , P_c - вероятности безотказной работы объекта при внезапных, параметрических и перемежающихся отказах соответственно.

Вероятность безотказной работы при перемежающихся отказах P_c зависит от многих факторов, плохо поддающихся учету, и обычно ее значение может быть определено только экспериментально, а в расчетах при проектировании перемежающиеся отказы не учитываются и принимается $P_c = 1$.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

При определении нормативных значений показателей (норм) надежности возможны два подхода - групповой и индивидуальный.

Групповые показатели надежности характеризуют уровень надежности только группы объектов (например, партии выпущенных изделий, станочного парка, парка машин или приборов и т.д.). При групповом подходе к оценке надежности используются в основном такие показатели надежности, как средний срок службы, интенсивность отказов и т.д.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Групповые показатели применяются для расчета номенклатуры и объема запасных частей, структуры и количества парка оборудования.

Индивидуальные показатели надежности характеризуют надежность каждого конкретного объекта. Для этого используются такие показатели как установленный ресурс или установленная наработка и т.д. Индивидуальные показатели надежности применяются для проверки соответствия изделий требованиям технической и конструкторской документации и разработки систем технического обслуживания и ремонта.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Выбор метода расчета надежности технических систем и обоснование норм надежности определяются номенклатурой показателей надежности, характером исходных данных, видом отказов, законом распределения времени между отказами, структурой объекта и характером взаимодействия его элементов, конструктивными и схемными особенностями, степенью готовности, т.е. этапом проектирования.

Некоторые рекомендации по обоснованию значений (норм) задаваемых показателей надежности приведены в ГОСТ 27.003-90.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

В общем случае задача обоснования норм надежности сводится к определению уровня надежности объекта, как можно более близкого к оптимальному и удовлетворяющего всем наложенным ограничениям. Для определения оптимального уровня надежности часто используются экономические показатели. Если, например, известны зависимости затрат на изготовление C_u объекта, эксплуатационных затрат $C_э$ и прибыли C_n от срока службы, то в качестве оптимального уровня надежности можно принять средний срок службы T_{onm} , при котором суммарная эффективность $C = C_u + C_э + C_n$ принимает максимальное значение.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Аналогично можно определить оптимальное значение вероятности безотказной работы и других нормируемых показателей надежности.

После нахождения оптимального уровня надежности проверяется его соответствие всем ограничениям (экономическим, конструктивным, технологическим и др., в том числе ограничениям по другим нормируемым показателям надежности). Если ограничения выполняются, то оптимальный уровень принимается в качестве нормы надежности. При проектировании новых технических объектов нормы надежности могут уточняться на каждом последующем этапе.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Нормы надежности (требуемые значения показателей надежности объекта) рассчитываются, как правило, на этапе эскизного проектирования при расчете нормативных данных по надежности отдельных блоков, узлов и подсистем, при определении минимально допустимого уровня надежности элементов и при сравнительной оценке надежности вариантов элементов. Обычно основная задача расчета надежности на этих этапах проектирования - определение возможности обеспечения требуемой надежности системы.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Для обеспечения единообразного подхода к формированию проектных норм надежности используется типовая структура нормативно-технических документов, излагающих проектные нормы надежности. Обычно нормативно-технические документы по конкретному виду технических объектов состоят из четырех разделов: проектные решения, количественные требования, качественные требования, источники отказов.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Определение норм или прикидочный расчет надежности для объекта и его элементов производится упрощенными методами с принятием следующих допущений: объект и его элементы подвержены только внезапным отказам (параметрические и перемежающиеся отказы не учитываются); параметры надежности подчиняются экспоненциальному закону (интенсивности отказов не зависят от времени); все элементы объекта равнонадежны ($\lambda_i = \lambda, p_i = p$); отказ любого элемента приводит к отказу системы.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Поскольку на начальных этапах проектирования применение методов повышения надежности объекта (в частности резервирования), как правило, не предусматривается, то для оценки норм надежности используются формулы для систем с последовательным соединением элементов:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i = p^n = \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right] = \exp(-\Lambda t), \quad (10.2)$$

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = n\lambda, \quad T = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i}} = \frac{t}{n}. \quad (10.3)$$

Исходными данными для расчетов являются количество элементов (блоков, узлов, устройств, приборов и т.д.), входящих в объект n , и необходимое время его работы T_0 (или наработка на отказ).

Тогда для каждого элемента должны выполняться условия:

$$t \geq t_0 = nT_0, \quad \lambda \leq \lambda_0 = \frac{1}{t_0} = \frac{1}{T_0}. \quad (10.4)$$

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Обоснование и расчет норм надежности

Если условия не выполняются, то необходимо уже на ранних этапах разработки предусматривать использование различных методов повышения надежности элементов (резервирование, облегчение режимов и т.д.).

Полученные на этом этапе расчета параметры надежности имеют лишь приближенное (оценочное) значение, позволяющее определить возможность построения технической системы без дополнительных средств повышения надежности ее элементов. При дальнейшем расчете значения характеристик надежности уточняются и корректируются.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

Ориентировочный расчет надежности обычно проводится при эскизном проектировании технического объекта, когда известна его структура, но нет данных о режимах и условиях работы всех его элементов.

Ориентировочный расчет проводится при следующих допущениях: отказы элементов являются случайными и независимыми; в расчете учитываются только элементы, входящие в основную функциональную схему объекта; параметры надежности подчиняются экспоненциальному закону (интенсивности отказов не зависят от времени); влияние условий работы учитывается приближенно; параметрические отказы не учитываются.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

При ориентировочном расчете часто используются данные об интенсивности отказов элементов, полученные в лабораторных условиях, с поправочным коэффициентом для реальных условий эксплуатации.

Если для элементов известны минимальные, средние и максимальные значения интенсивностей отказов $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\text{ср}}$, $\lambda_{\max}$, то для вероятности их безотказной работы и средней наработки также определяются минимальное, среднее и максимальное значения:

$$p_{\min} = \exp(-\lambda_{\max}t), p_{\text{ср}} = \exp(-\lambda_{\text{ср}}t), p_{\max} = \exp(-\lambda_{\min}t), (10.5)$$

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

$$t_{min} = \frac{1}{\lambda_{max}}, t_{cp} = \frac{1}{\lambda_{cp}}, t_{max} = \frac{1}{\lambda_{min}}, \quad (10.6)$$

Далее при ориентировочном расчете определяются минимальные, средние и максимальные (или только средние) значения показателей надежности блоков (узлов, систем, составных частей и т.д.) и системы в целом с использованием известных методов расчета.

Одной из задач при ориентировочном расчете надежности является определение ожидаемого закона распределения наработки на отказ (между отказами) или ресурса объекта в целом и его элементов.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

В случаях, когда экспериментальные данные отсутствуют, для определения вида и характеристик распределения можно воспользоваться результатами анализа статистических данных элементов и систем аналогичного класса и назначения или справочными данными о периодичности их ремонтов. Вид закона распределения определяется также характером ожидаемых отказов объекта.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

Точность в оценке вида и параметров распределения ресурса зависит также от правильности учета факторов, влияющих на разброс значений показателей надежности. Доминирующими факторами при этом являются характер отказа базового элемента, стабильность условий эксплуатации, степень нагруженности и уровень технологии изготовления.

При стабильных условиях эксплуатации и режимах работы в случае износных отказов чаще всего наблюдается нормальный закон распределения характеристик, при усталостном разрушении - закон Вейбулла.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Ориентировочный расчет надежности

Условия работы объекта, такие, как интенсивность его эксплуатации и ее вариативность, климатические условия, уровень технического обслуживания, сказываются на разбросе его ресурсных характеристик - при максимальных режимах разброс меньше, чем при средних.

Аналогично, чем выше уровень технологии (серийность, степень унификации и стандартизации, степень специализации производства, наличие и уровень контроля качества, стабильность свойств сырья и материалов, и т.д.), тем меньше разброс ресурсных характеристик, т.е. выше стабильность свойств надежности объекта.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

Полный расчет надежности технического объекта при его разработке производится с учетом параметрических отказов, влияния отказов вспомогательных элементов и уточненных условий работы.

Исходными данными для расчета являются структурная схема объекта, характеристики надежности основных и вспомогательных элементов, условия работы элементов и объекта в целом и их изменение в течение всего периода эксплуатации.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

Расчет надежности проводится в следующей последовательности:

1. Выделяются основные элементы системы, определяющие выполнение заданных функций, и вспомогательные, частично влияющие на надежность основных элементов и системы (приборы контроля, предохранительные элементы и т.д.).
2. Определяются режимы работы элементов системы.
3. Определяются возможные изменения режимов работы основных элементов при отказах вспомогательных элементов.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

Расчет надежности проводится в следующей последовательности:

4. Устанавливаются возможные пределы изменения внешних факторов в условиях эксплуатации (температуры, влажности, давления, ускорений, ударов, вибраций, состава воздуха и агрессивных сред, излучения и т.д.), их влияние на работоспособность элементов и системы.
5. Определяются значения интенсивности внезапных отказов и рассчитываются вероятности безотказной работы элементов с учетом реальных режимов и условий их работы.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

Расчет надежности проводится в следующей последовательности:

6. Определяются вероятности безотказной работы элементов по параметрическим отказам, вызванных изменением характеристик самих элементов, режимов и условий его работы.
7. Определяется полная надежность отдельных элементов.
8. По известным структурным схемам определяется надежность блоков, подсистем, групп элементов и системы в целом.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

Если режимы и условия эксплуатации объекта существенно меняются для отдельных этапов работы или в процессе эксплуатации в работе объекта участвуют разные элементы (одни включаются, другие выключаются, т.е. по сути периодически меняется структурная схема системы), то расчет надежности производится отдельно для каждого этапа. При необходимости наряду с расчетом ожидаемых значений характеристик надежности рассчитываются также их минимальная и максимальная оценки.

Проектирование надежности систем

Задачи и методы проектных исследований надежности

Полный расчет надежности

В процессе дальнейшей разработки и эксплуатации объекта расчет надежности уточняется, в том числе после экспериментальных исследований надежности и контрольных испытаний опытных образцов.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Расчет безотказности системы возможен, если известны функциональная схема системы и сведения о работоспособности ее составных частей (элементов). По этим данным определяется вероятность безотказной работы системы.

Однако для механических систем возможности расчета безотказности при проектировании значительно ограничиваются.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Принципиальное отличие механических систем от других, например электронных и электрических, состоит в том, что при проектировании последних используются в основном типовые элементы с известными характеристиками, а при проектировании механических систем большинство элементов проектируется и изготавливается именно для данной системы и их характеристики надежности при проектировании часто неизвестны.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Эта особенность не только ограничивает возможности прогнозирования безотказности механических систем при проектировании, но и обуславливает необходимость изменения последовательности проектирования.

Для количественной оценки надежности при проектировании сложной системы необходимо выбрать модель ее функционирования, которая должна учитывать зависимость надежности от основных определяющих факторов и в то же время не быть чрезмерно сложной.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Модель функционирования системы можно сформировать как совокупность связей между действующими на систему нагрузками и состояниями системы. Если известно правило разграничения работоспособных и неработоспособных состояний, то можно определить, в каком из этих состояний находится система. Однако при большом числе элементов системы расчет надежности таким способом становится очень трудоемким.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Влияние внешних воздействий на состояние элементов нижнего уровня системы считается известным, если известны вероятностно-статистические характеристики их состояний при расчетных условиях эксплуатации. В этом случае можно составить модель надежности, достаточно строго соответствующую реальному процессу функционирования системы. Наибольшее распространение получили модели с использованием структурно-логических схем.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Исходными данными для расчета или прогнозирования безотказности на стадии проектирования служат связи элементов в структурно-логической схеме системы, зависящие от влияния их состояния на состояние системы в целом и значения интенсивности их отказов (или вероятность отказов, или вероятность работоспособных состояний).

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Для электрических и электронных систем, в которых элементами служат резисторы, конденсаторы, транзисторы и т.д., выпускаемые в неизменном конструктивном оформлении и по неизменной технологии большими партиями, можно определить зависимости интенсивности их отказов или вероятности безотказной работы по данным испытаний для различных условий и использовать затем эти зависимости при прогнозировании надежности вновь создаваемых систем.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Для вновь проектируемых механических систем многие даже простые элементы (валы, зубчатые колеса, диски трения и т.д.) изготавливается в индивидуальном конструктивном оформлении и по индивидуальной технологии. При этом каждый элемент отличается множеством признаков: размерами, наличием шлицев, резьбы, выточек, галтелей, точностью обработки, прочностными свойствами материалов и их зависимостями от термообработки и т.д.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Практически каждая деталь не является элементом конечной сложности (в отличие от элементов радиотехники и электроники), так как отказы даже достаточно простых деталей происходят из-за отказов различных элементов этих деталей (из всех разрывов стержней болтов от усталости 15 % приходится на разрывы у головки болта, 20 % - на последний виток нарезки болта, 65 % - на зону первого витка гайки со стороны приложения нагрузки).

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Поэтому для вновь проектируемой механической системы часто нельзя с достаточной определенностью рассчитать количественные показатели надежности, пока не будет известно конструктивное оформление ее элементов. Для оценки надежности новых механических устройств необходимы всесторонние лабораторные испытания составных элементов и стендовые испытания узлов и агрегатов.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Другой путь получения оценок надежности новых механических систем при их проектировании - расчет элементов этой системы с учетом вероятностных распределений внешних нагрузок и несущей способности элемента.

Особенность проектирования механических, гидро- и пневмосистем заключается в том, что вследствие ряда условий сопряжения деталей в пространстве, необходимости использования стандартных и унифицированных деталей и их элементов часть деталей в системе имеют габариты большие, чем это необходимо по критериям прочности и жесткости, и являются заведомо надежными.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Однако почти всегда в конструкции имеются детали, размеры которых не могут быть увеличены вследствие ряда ограничений. Эти детали и выступают в качестве устройств, лимитирующих надежность всей конструкции. Вероятностные расчеты по обеспечению надежности целесообразно осуществлять в первую очередь именно для таких деталей.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

В то же время следует иметь в виду, что если известны уровни надежности составляющих систему элементов (это могут быть целые агрегаты, механизмы, приборы и подсистемы) и связи этих элементов между собой, то для прогнозирования надежности механических систем могут быть использованы методы оценки схемной надежности. Такие возможности обычно появляются для механических систем, состоящих из отдельных подсистем, агрегатов, узлов, переходы каждого из которых из работоспособного состояния в неработоспособное происходят независимо друг от друга.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Оценка схемной надежности механической системы при проектировании целесообразна также для многофункциональных систем, когда по вероятности выполнения отдельных функций требуется определить общую вероятность безотказного функционирования системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Оценка схемной надежности механической системы при проектировании целесообразна также для многофункциональных систем, когда по вероятности выполнения отдельных функций требуется определить общую вероятность безотказного функционирования системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы с последовательно-параллельным соединением

Механические системы при расчете их безотказности по критерию факта отказа обычно представляются в виде структурной схемы с последовательно-параллельным соединением элементов.

Если в системе с последовательно соединенными элементами часть элементов работает меньшее время, чем система в целом, то это необходимо учесть в расчете вероятности безотказной работы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

При расчете безотказности по критерию наличия отказа иногда даже в несложных системах невозможно или весьма затруднительно представить систему в виде параллельно-последовательного соединения элементов.

Так, при двух или трех параллельно работающих фильтрах, например, топливных, отказ одного из фильтров вследствие засорения сохраняет систему работоспособной (фильтры обычно проектируются с запасом пропускной способности), отказ же одного из фильтров вследствие течи приводит к отказу системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

Таким образом, в первом случае фильтры можно считать соединенными параллельно, а во втором - последовательно. Даже если в системе один фильтр, например масляный, но с перепускным клапаном, то при засорении он обеспечивает сохранение работоспособности системы, а при отказе фильтра вследствие течи произойдет отказ системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

Различные отказы сцепления автомобиля по-разному влияют на работоспособность. Если, например, сцепление не включается, то машина не может двигаться, при отказе же вследствие невыключения сцепления (заедание) возможен запуск и движение машины (при некоторых конструктивных решениях).

Во многих случаях решение задачи оценки безотказности системы облегчается составлением функций алгебры логики (ФАЛ), которые определяют условия работоспособности или отказа системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

Последовательность расчета безотказности с использованием функций алгебры логики аналогична расчету с использованием последовательно-параллельного соединения. При этом на основании сформулированных условий работы строится логическая схема ФАЛ или логическая матрица, составляется уравнение алгебры логики (уравнение событий безотказной работы или отказа) и затем - расчетное вероятностное уравнение.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

При составлении ФАЛ для механических систем можно применять два метода. Первый метод состоит в определении всех возможных минимальных условий по безотказности элементов, которые обеспечивают работоспособное состояние системы. Второй метод состоит в рассмотрении всех возможных несовместных работоспособных состояний системы. Первый метод, как правило, короче, но в этом случае требуется учитывать совместность событий (работоспособных состояний) системы. Второй метод более громоздкий, но зато практически безошибочен.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Системы со сложной структурой

Так как в большинстве случаев перебор вариантов работоспособных состояний в механических системах невелик, то рекомендуется применять второй метод.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Многофункциональные системы

Для оценки безотказности многофункционального изделия целесообразно разделять это изделие по его функциональным назначениям и оценивать безотказность по каждой функции. При этом критерием отказа системы является факт невозможности выполнения соответствующей функции.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Многофункциональные системы

Для расчета безотказности многофункциональных систем со сложной структурой применение методов, рассмотренных ранее, нецелесообразно, так как возможны ошибки в составлении и определении всех зависимостей между состояниями элементов системы и самой системы. В этом случае целесообразно дополнить рассмотренные ранее методы составлением полной логической матрицы работоспособности.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

При обосновании уровня показателей безотказности также, как и при выборе этих показателей, используются различные методы в зависимости от основного критерия оценки функционирования - экономической эффективности, требований безопасности или безусловного выполнения поставленной задачи.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Для систем, основным критерием оценки функционирования которых является экономическая эффективность, применяются два метода:

- ✓ обоснование нормы надежности по критерию минимума суммарных затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию системы;
- ✓ обоснование нормы надежности по критерию максимума эффекта на единицу суммарных затрат.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Общим основным принципом этих методов является обоснование требований безотказности затратами на изготовление и эксплуатацию системы и эффективностью ее функционирования. Как правило, повышение безотказности системы связано с увеличением затрат на разработку и производство, связанных с проработкой различных конструктивных вариантов, применением материалов с улучшенными характеристиками, резервированием и т.д. Поэтому требования к безотказности находятся в определенном противоречии с требованием ограничения стоимости системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Общим основным принципом этих методов является обоснование требований безотказности затратами на изготовление и эксплуатацию системы и эффективностью ее функционирования. Как правило, повышение безотказности системы связано с увеличением затрат на разработку и производство, связанных с проработкой различных конструктивных вариантов, применением материалов с улучшенными характеристиками, резервированием и т.д. Поэтому требования к безотказности находятся в определенном противоречии с требованием ограничения стоимости

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

В то же время затраты, связанные с эксплуатацией более надежной системы, могут быть снижены вследствие сокращения затрат на ремонт и техническое обслуживание, кроме того использование системы с более высоким уровнем безотказности даст больший эффект.

Если определяющим фактором при оценке экономической эффективности является сам факт отказа и связанные с ним затраты на техническое обслуживание и ремонт, то целесообразно использовать первый из методов нормирования безотказности, если же определяющими являются потери производимой продукции, то второй.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

При использовании критерия минимума суммарных затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию необходимо:

определить функциональные зависимости стоимости разработки C_p , изготовления C_u , эксплуатации C_e от изменения безотказности системы и аналитически или графически определить оптимальное значение безотказности $P(t)_{opt}$, соответствующее минимуму суммарных затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Трудность применения метода заключается в том, что для достоверных оценок экономической эффективности при использовании функциональных зависимостей между надежностью и стоимостью требуется большое количество статистических данных и большой опыт по производству и эксплуатации устройств конкретного вида. При этом для различных устройств аналитические зависимости могут иметь различный вид.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Нужно также учитывать, что при создании техники и ее эксплуатации на экономическую оценку эффективности оказывает влияние большое число факторов, из которых сложно выделить основные.

При использовании критерия максимума эффективности на единицу суммарных затрат определяется коэффициент нормирования надежности

$$K_n = \frac{\mathcal{E}}{C}, \quad (10.7)$$

где $\mathcal{E}$ - суммарный эффект от использования системы в течение ремонтного цикла; C - суммарные затраты на изготовление и эксплуатацию системы за тот же период.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Расчетные формулы для определения K_n учитывают факторы конструктивного решения, режим использования системы по назначению и последствия отказов. Для определения оптимального значения K_n необходимо определить коэффициент нормирования надежности для всех возможных вариантов изготовления устройства K_{ni} , и тот вариант, который обеспечивает максимум K_{ni} , принимается за оптимальный и подлежит реализации.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Таким образом, существенной трудностью применения методики является необходимость иметь разработанные варианты устройств, различные стоимостные оценки и величины показателей надежности для всех сравниваемых вариантов.

Для систем, основным критерием оценки функционирования которых является требование безопасности или требование безусловного выполнения задачи, при определении требуемой вероятности безотказной работы необходимо учитывать те последствия, к которым ведет появление опасных отказов.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

По последствиям опасных отказов системы этого класса делятся на следующие виды:

- ✓ системы с катастрофическими последствиями;
- ✓ системы с компенсацией последствий отказа за счет перегрузки системы или оператора, в результате чего значительно увеличивается вероятность их отказа;
- ✓ системы с возможностью продолжения выполнения задачи без компенсации последствий отказа, но при худших характеристиках;

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

- ✓ системы с временным резервированием, когда для устранения опасного отказа можно на время $t < t_{рез}$ прервать функционирование системы.

В *системах с катастрофическими последствиями отказов* отказы недопустимы. Нормирование безотказности в этом случае основано на использовании принципа «практической уверенности».

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Тогда вопрос сводится к обоснованному назначению границы пренебрежимо малых вероятностей, т.е. к выяснению, насколько малой должна быть вероятность отказа системы за время выполнения задания, чтобы отказ можно было считать практически невозможным. В этом состоит основная трудность применения метода, т.к. назначение практически достоверных и практически невозможных событий не является чисто математическим вопросом, а связано с существом решаемых задач, с конкретными ситуациями, для которых они определяются и назначаются.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Например, система выпуска шасси пассажирского самолета относится к системе с катастрофическими последствиями отказов, поэтому ее отказ должен быть практически невозможным событием. Обычно принимается, что события практически не происходят, если их вероятность $Q < 10^{-6}$, поэтому вероятность безотказного функционирования этой системы при каждом использовании должна быть $P > 0,999999$.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

В *системах с компенсацией последствий отказа* за счет перегрузки системы или оператора используется метод, основанный на опыте предыдущих разработок и корреляционного анализа для установления связи между безотказностью и другими техническими характеристиками систем-аналогов. Трудность при использовании метода состоит в обосновании выбора из определенной номенклатуры факторов, которые по предположению коррелируют с показателем безотказности, особенно при ограниченном количестве сопоставляемых аналогов.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Для систем с компенсацией применим также принцип «практической уверенности».

Для *систем, работающих с ухудшенными характеристиками после отказа*, наиболее применим метод, основанный на определении требуемой эффективности системы W с учетом ее безотказности

$$W = W_0 P(t), \quad (10.8)$$

где W_0 - эффективность абсолютно надежной системы;
 $P(t)$ - вероятность безотказной работы системы за время ее применения.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Для *систем с временным резервированием* для устранения опасного отказа которых можно на время прекратить функционирование, используется метод анализа и моделирования ситуаций. Рассматриваются системы, в которых общее время восстановления после отказов за время выполнения задания не должно превышать $t_{рез}$, и системы, в которых каждое (или одно допускаемое) восстановление должно быть по времени меньше $t_{рез}$.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Там, где это возможно, используется нормирование надежности систем второго класса с экономическим обоснованием, например, по критерию минимизации суммы затрат на производство и эксплуатацию или по критерию минимизации стоимости выполнения поставленной задачи.

Каждый из методов нормирования имеет определенные недостатки, затрудняющие его использование. Поэтому для лучшего обоснования принимаемых решений возможно сочетание методов.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Если рассматриваемая система (агрегат) является элементом (составной частью) системы более высокого порядка, требования по безотказности к которой уже обоснованы, то требования к рассматриваемой подсистеме (агрегату) могут быть определены с учетом безотказности системы, в которую рассматриваемая подсистема входит составной частью.

Требования по безотказности распределяются сначала на стадии эскизного проектирования для основных элементов системы, а затем на стадии технического проекта - для всех элементов системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

Для распределения требований по безотказности между элементами системы могут быть использованы различные способы: исходя из условия равной надежности элементов системы, с учетом сложности и значимости элементов, с учетом безотказности аналогов, исходя из условия минимальной суммарной стоимости элементов системы.

Проектирование надежности систем

Расчет безотказности систем при проектировании

Требования к показателям безотказности систем и агрегатов

В общем случае распределение требований представляет сложную задачу. Поэтому на первом этапе принимаются различные допущения, облегчающие ее решение: отказы элементов считаются независимыми, элементы соединены последовательно, интенсивность отказов элементов постоянна. В процессе последующего проектирования задача решается методом последовательного приближения.

Проектирование надежности систем

Проектный анализ надежности систем

Структурный анализ используют для раскрытия внутренних связей элементов и исследуемого объекта в целом, установления закономерностей этих связей и возможностей управления ими для достижения определенных целей. В данном случае объектом управления является надежность объекта, а целью управления - минимизация ремонтных оперативных затрат, а также других потерь, связанных с восстановлением работоспособности техники.

Проектирование надежности систем

Проектный анализ надежности систем

Структура надежности должна быть представлена таким образом, чтобы с ее помощью можно было бы определить вероятность реализации заданных минимальных ремонтных оперативных затрат в течение заданной наработки объекта.

Для управления показателями долговечности механической системы минимальные оперативные ремонтные затраты принимаются по критерию ее предельного состояния, а для управления показателями безотказности - по соответствующему критерию отказа.

Проектирование надежности систем

Проектный анализ надежности систем

Расчет структурных схем надежности

Предельное состояние большинства ремонтируемых технических систем приводит к необходимости проведения капитального ремонта. Критерием такого предельного состояния являются минимальные ремонтные оперативные затраты, которые определяются составом слесарных работ при агрегатно-узловой технологии капитального ремонта системы.

Данный критерий однозначно оценивает только конструктивные особенности технической системы и не связан с принятой технологией ремонта.

Проектирование надежности систем

Проектный анализ надежности систем

Расчет структурных схем надежности

В качестве критерия предельного состояния может быть выбран сколько угодно низкий уровень ремонтных затрат, определяемый лишь долей затрат ремонтных операций капитального ремонта.

Предельное состояние объекта в целом может быть реализовано только при появлении какой-либо комбинации предельных состояний его элементов (сборочных единиц), за критерий которых принимают также минимальные оперативные затраты разборки и последующей сборки этих узлов .

Проектирование надежности систем

Проектный анализ надежности систем

Расчет структурных схем надежности

В качестве критерия предельного состояния может быть выбран сколько угодно низкий уровень ремонтных затрат, определяемый лишь долей затрат ремонтных операций капитального ремонта.

Предельное состояние объекта в целом может быть реализовано только при появлении какой-либо комбинации предельных состояний его элементов (сборочных единиц), за критерий которых принимают также минимальные оперативные затраты разборки и последующей сборки этих узлов .