

5. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОСТЫХ СИСТЕМ

5.1. Этапы оценки надежности систем

Условно задачи исследования надежности можно подразделить на два типа: оценка надежности системы с заданной структурой и параметрами элементов; синтез системы, т.е. определение рациональной структуры и параметров системы, обеспечивающих заданный уровень надежности. Задачи анализ более просты в решении (хотя и в этой области исследований имеются свои проблемы), для них разработан достаточно эффективный математический аппарат. Задачи определения рациональных параметров, а тем более, структурный синтез системы по показателям надежности, не имеют регулярных методов решения, за исключением некоторых простых ситуаций. Часто задачи синтеза решаются путем анализа некоторых возможных вариантов построения системы и выбора из них лучшего. Такой подход не обеспечивает оптимального синтеза, но позволяет выбрать рациональный вариант построения системы.

Исследование надежности системы осуществляется с применением аналитических или имитационных моделей. Общая методология решения задачи по оценке надежности системы основывается на системном подходе и аналогична любым другим задачам исследования. Последовательность решения включает следующие этапы.

1. Формирование постановки задачи.

Начинается с определения задачи исследования, назначения, места и роли исследуемой системы в старшей системе. Это позволит определить тип системы (восстанавливаемая, невосстанавливаемая), перечень выполняемых функций, состав оцениваемых показателей и требования к ним, условия и режимы функционирования элементов системы. Необходимо учитывать, что сложные условия эксплуатации могут приводить к возрастанию интенсивности отказов элементов на порядок или даже выше по сравнению с обычной ситуацией.

Определение количественных показателей надежности системы во многих случаях не является самоцелью, а помогает выявить слабые места и определить пути и средства повышения надежности.

2. Составление модели системы.

Наличие сведений о надежности изделий являются основой выделения элементов системы. По каждому элементу производится обоснование исходных данных по надежности. Сведения по надежности элементов формируются на основе данных изготовителей изделий, а для вновь создаваемых объектов с учетом уровня надежности отечественных и зарубежных аналогов (прототипов), экономических и других факторов.

Модель надежности системы должна связать параметры надежности элементов с показателями надежности системы в целом или ее подсистем. Для этого необходимо:

составить перечень функций изделия;

для каждой функции определить реализующую ее систему, т.е. перечень элементов и их взаимосвязи;

формализовать понятие отказа элемента и системы;

выбрать способ описания условий работоспособности системы;

составить описание, раскрывающее логику возникновения отказов системы при нарушениях работоспособности элементов.

Составленное описание условий работоспособности является основой для формирования расчетных соотношений по оценке надежности. Именно расчетные соотношения по оценке показателей надежности системы являются моделью надежности системы.

Существует несколько методов расчета надежности систем со структурной избыточностью, к числу наиболее употребительных относятся *вероятностный* и *логико-вероятностный*. Вероятностный метод расчета применяется для простых систем, а логико-вероятностный для оценки надежности сложных объектов. Свои методы применяются при исследовании надежности систем с временным резервом.

3. Исследование модели.

Исследование модели предполагает:

вычисление значений показателей надежности для различных вариантов исходных данных, касающихся параметров элементов и структуры системы, условий функционирования. Оценку надежности выполняют обычно для стационарного режима работы системы. Однако следует учитывать, что в реальных условиях стационарность может быть нарушена изменениями окружающей среды, заменой программного обеспечения, сменой пользователей и обслуживающего персонала или изменением их свойств. Подобного рода изменения учитываются введением поправочных коэффициентов к показателям надежности элементов;

анализ влияния элементов на надежность системы, выявление элементов, оказывающих наибольшее влияние на надежность;

сопоставление показателей с требуемыми значениями;

анализ влияния допущений и ограничений, принятых при построении модели;

формирование выводов по результатам исследования модели и предложений по повышению надежности системы.

Следует учитывать, что результаты моделирования надежности носят приближенный характер и имеют вероятностную природу. Закономерности будут проявляться только для массовых явлений или при длительном функционировании системы.

5.2. Способы описания условий работоспособности системы

Описание работоспособности определяет условия, при которых система может выполнять заданные функции. Такое описание можно представить в словесном виде, графически и аналитически [12].

Словесное описание является вполне очевидным и простым для понимания. Оно применяется на начальных этапах формализации условий

работоспособности. Основным недостатком такого описания сложных систем состоит в отсутствии строгости задания взаимосвязей условий работоспособности элементов и системы в целом. Это обстоятельство затрудняет переход от словесного описания к расчетным соотношениям. Кроме того, оно обычно характеризуется громоздкостью и может не обеспечивать однозначности понимания условий. Для простых систем при наличии опыта такого описания бывает достаточно для перехода к построению расчетных соотношений.

Графическое описание представляет собой надежностьную схему (граф), отражающую связь работоспособных состояний элементов и системы в целом. Графическое представление должно определять логику возникновения отказов и восстановлений в системе, т.е. оно представляет логику связей между событиями "отказ" или "восстановление" элементов с аналогичными событиями системы.

Описание такой связи в простых системах основано на выделении одной вершины графа как "источника" информации и другой вершины как "получателя" информации. Каждая вершина соотносится с другими элементами системы. Можно применять ориентированные или неориентированные взвешенные графы. Ветви (ребра) графа характеризуют информационные связи элементов. Система считается работоспособной при наличии хотя бы одного пути между начальной и конечной вершинами. Веса вершин соответствуют показателям надежности элементов.

Однако более часто применяют другую форму представления графа, когда элементам системы соответствуют не вершины, а ветви, т.е. каждый элемент является двухполюсником. Предполагается, что если элемент работоспособен, то соответствующая ему ветвь обеспечивает соединение вершин графа, иначе данная ветвь отсутствует. В этом случае порядок соединения ветвей отражает логику возникновения системных событий. А определенная совокупность ветвей, определяющая некоторую работоспособную конфигурацию системы, должна соответствовать пути, который соединяет источник и получатель информации. Построенный по этим правилам граф позволяет перечислить все пути между источником и получателем, т.е. определить все работоспособные конфигурации системы.

В многофункциональных системах строят отдельный граф для каждой функции или единый граф с несколькими источниками и получателями.

Графическое представление не всегда в полной мере отражает логику возникновения отказов. Так в сложных системах практически невозможно графически отразить некоторые существенные компоненты логики работы системы:

ограничения на применение некоторых путей. Такие ограничения могут быть связаны с "длиной" пути, правилами доступа к информации, особенностями алгоритмов оповещения о состоянии элементов и управления передачей информацией в вычислительных сетях и т.п.;

взаимозависимость надежности элементов.

Графическое представление является наглядным для относительно несложных систем, но неполным и неоднозначным. Поэтому это представление должно дополняться словесным описанием особенностей в проявлении работоспособности системы.

Аналитическое описание условий работоспособности проводится с применением алгебры логики. Такое описание является строгим и однозначным, но менее наглядным и более сложным по сравнению с ранее рассмотренными. Именно его применяют как основу построения расчетных соотношений для оценки надежности сложных систем. Сущность аналитического описания условий работоспособности будет рассмотрена при описании моделей сложных систем.

Учитывая особенности способов описания систем, целесообразно их совместное применение, что позволит компенсировать недостатки и обеспечит требуемый уровень понимания, наглядности и строгости.

5.3. Оценка надежности невосстанавливаемых последовательных систем

В теории надежности, подобно общей теории систем, под элементом понимают относительно самостоятельную и четко выделенную (конструктивно или функционально) часть системы, дальнейшая детализация которой нецелесообразна в рамках данного исследования. Хотя в рамках другого исследования элементы могут быть представлены в виде системы. Показатели надежности элементов выступают как исходные данные для расчета надежности системы.

Основными допущениями при составлении вероятностной модели надежности являются следующие:

каждый элемент и система в целом могут находиться в состоянии полной работоспособности или полного отказа;

состояние системы детерминировано зависит от состояния элементов, т. е. показатель надежности системы является функцией от показателей надежности элементов. Вид функции определяется структурой системы.

Эти положения являются весьма условными для сложных систем с частичной работоспособностью, однако они вполне справедливы при рассмотрении каждой конкретной функции. Модели, построенные на основе перечисленных допущений, имеют ясный физический смысл, строгое аналитическое обоснование и по точности оценки вполне пригодны для инженерной практики.

Многие системы не имеют избыточности. Требуемый уровень надежности таких систем достигается за счет применения надежных элементов, создания оптимальных условий эксплуатации, контроля технического состояния. Если отказ хотя бы одного элемента \mathcal{E}_i ($i=1, 2, \dots, m$) приводит к отказу всей системы, то такие элементы в надежности схеме соединены последовательно, рис. 5.1. Последовательное соединение в указанном смысле не всегда совпадает с физически последовательным соединением. Кроме того, для различных типов отказов одно и то же

физическое соединение в плане надежности может трактоваться различно, например, соединение элементов в электрической сети для отказов типа "обрыв" и "короткое замыкание". В последовательной надежности схеме (графе) существует только один путь между источником (И) и получателем (П). Если надежность каждого элемента не зависит от надежности других элементов, то порядок расположения ветвей графа не имеет значения.

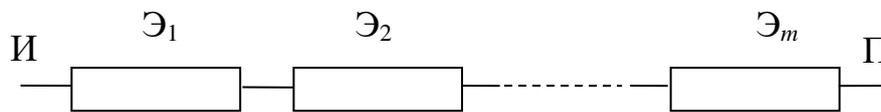


Рис. 5.1.

Последовательная надежность схема

Случайная наработка t_C до отказа системы из m последовательно соединенных, независимых по надежности элементов определяется минимальным значением случайных наработок t_i ее элементов

$$t_C = \min(t_1, t_2, \dots, t_m). \quad (5.1)$$

Вероятностный метод расчета предусматривает в первую очередь вычисление вероятности безотказной работы. Система работоспособна только тогда, когда работоспособны все элементы, следовательно, вероятность безотказной работы системы в течение времени t определяется путем умножения вероятностей безотказной работы элементов

$$P_C(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_m(t). \quad (5.2)$$

В общем случае значение средней наработки до отказа можно представить в виде интеграла (2.7а), который обычно удается взять лишь численным способом.

Для показательного распределения наработок до отказа элементов $P_i(t) = \exp\{-\lambda_i t\}$ вероятность безотказной работы системы

$$P_C(t) = \exp\{-\Lambda t\}, \quad (5.3)$$

где $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m$.

Все характеристики надежности для этого вида распределения можно получить, зная интенсивности отказов элементов, в частности, средняя наработка системы до отказа $T_C = 1/\Lambda$.

В реальных условиях значения λ_i зависят от условий эксплуатации. На стадиях создания системы трудно получить зависимости значений λ_i от условий работы элементов, а для новых элементов могут вообще отсутствовать достоверные данные об их надежности в конкретных условиях эксплуатации, да и сами условия могут быть точно неизвестны. В такой ситуации оценка показателей надежности, полученная на основе экспоненциального распределения наработок до отказа, пригодна для сравнительного анализа различных вариантов построения системы.

Если не все элементы системы непрерывно работают от начала до завершения выполнения функции, то вероятность безотказной работы можно вычислить по формуле $P_C(t) = P_1(\Delta t_1) P_2(\Delta t_2) \dots P_m(\Delta t_m)$, где Δt_i – время работы i -го элемента. Расчетные соотношения для остальных показателей надежности остаются справедливыми и в этом случае.

На практике возможна зависимость элементов по надежности, когда ухудшение характеристик одного элемента приводит к отказу других элементов. Аналогичная ситуация возникает, если на все элементы системы воздействует один и тот же неблагоприятный внешний фактор (повышенная температура, вибрация и т.д.). В этом случае все элементы становятся менее надежными. Тогда рассчитанные значения вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа можно рассматривать как оценку сверху. Поэтому проектный анализ надежности системы целесообразно вести и для другого крайнего случая, задавая верхнюю границу интенсивностей отказов элементов, что позволит оценить нижнюю границу указанных показателей.

5.4. Оценка надежности восстанавливаемых последовательных систем

В восстанавливаемых системах действуют так называемые альтернирующие процессы – отказы и восстановления, а также приходится учитывать ряд существенных особенностей, связанных с контролем работоспособности, режимами восстановления. Поэтому исследование надежности таких систем существенно сложнее, чем невозстанавливаемых систем. Во многих инженерных методиках предполагается, что контроль работоспособности является идеальным – отказы обнаруживаются мгновенно и достоверно. Но и при этом допущении аналитические модели для оценки показателей надежности восстанавливаемых систем даже простой структуры можно получить только для случая, когда все распределения наработок между отказами и времени восстановления элементов распределены по показательному закону. Функционирование такой системы описывается однородным случайным марковским процессом.

Предположение о марковских процессах во многих случаях не справедливо. Особенно это относится к процессу восстановления, поскольку допущение о независимости оставшейся длительности восстановления от уже затраченного времени на ремонт весьма неправдоподобно. Однако, если средняя наработка на отказ элементов значительно превышает среднее время восстановления, то многие показатели надежности практически не зависят от характера распределения времени восстановления. Это обстоятельство и учитывается в инженерных методиках расчета.

Если известны интенсивности отказов и восстановлений элементов, то можно построить граф переходов, вершинами которого будут состояния системы, а дуги будут отображать возможные переходы из одного состояния в другое. Эти переходы соответствуют отказам и восстановлениям элементов системы. Каждой дуге приписывается вес, соответствующий интенсивности отказа или восстановления. На основе графа переходов составляется система дифференциальных или линейных уравнений, решение которой позволит получить искомые показатели надежности системы. Применение графоаналитического метода на основе марковских процессов приводит к относительно трудоемкой вычислительной схеме. Для инженерных расчетов проще воспользоваться другим подходом.

В зависимости от того, сколько элементов в системе может одновременно восстанавливаться, различают два режима восстановления:

неограниченное восстановление, когда в любой момент может восстанавливаться любое число отказавших элементов. В этом случае предполагается, что для любого отказавшего элемента найдется ремонтная бригада;

ограниченное восстановление, когда в любой момент времени может восстанавливаться не более некоторого количества отказавших элементов (например, одного). Такой случай характерен при наличии ограниченного количества ремонтных бригад. Дефицит ремонтных органов приводит к затягиванию работ по восстановлению.

В условиях применения высоконадежных элементов и при малом времени ремонта (по сравнению с наработкой на отказ) одновременный отказ двух и более элементов маловероятен. Поэтому можно за основу выбрать режим неограниченного восстановления.

Режимы восстановления различают также в зависимости от состояния системы в период ремонта. При выключении системы на время ремонта новые отказы невозможны во время восстановления отказавшего элемента. Если система не выключается, то во время ремонта возможно возникновение новых отказов. Эти особенности не учитывают, если время восстановления элемента существенно меньше средней наработки на отказ любого другого из элементов.

Указанными обстоятельствами объясняется замена столь информативного показателя как вероятность безотказной работы на другой, существенно уступающий ему параметр – коэффициент готовности. Составленное ранее соотношение (9.2) вполне пригодно для оценки коэффициента готовности восстанавливаемых систем. Для этого достаточно вероятности безотказной работы заменить на коэффициенты готовности. В качестве исходных данных могут выступать коэффициенты готовности или средние значения времени наработки на отказ и времени восстановления элементов. Во втором случае коэффициенты готовности элементов вычисляются по формуле (2.12). Считая отказы и восстановления элементов независимыми событиями в своей совокупности, коэффициент готовности системы

$$k_{Г,С} = k_{Г,1} k_{Г,2} \dots k_{Г,m}, \quad (5.4)$$

где $k_{Г,i}$ – коэффициент готовности i -го элемента, $i = 1, 2, \dots, m$.

Однако вычисление средней времени наработки на отказ и среднего времени восстановления системы в общем случае вызывает значительные трудности. Это связано с тем, что интервалы времени восстановления элементов могут не совпадать, совпадать частично или полностью. Поэтому даже зная коэффициент готовности системы

$$k_{Г,С} = T_{О,С} / (T_{О,С} + T_{В,С})$$

невозможно из этого уравнения определить два неизвестных показателя, содержащиеся в правой части.

Для систем с неограниченным восстановлением, в которых все распределения наработок до отказа и времени восстановления распределены по экспоненциальному закону, можно получить аналитические соотношения по расчету и других показателей надежности. Если система после отказа элемента не выключается (во время ремонта могут происходить отказы элементов), то показатели надежности такого объекта вычисляются по простым соотношениям:

интенсивность отказов

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m; \quad (5.5a)$$

среднее время наработки на отказ

$$T_{O,C} = 1 / \Lambda; \quad (5.5б)$$

среднее время восстановления

$$T_{B,C} = T_{O,C}(1 - k_{Г,C}) / k_{Г,C}; \quad (5.5в)$$

вероятность безотказной работы в течение времени t

$$P(t) = \exp(-\Lambda t); \quad (5.5г)$$

коэффициент оперативной готовности

$$k_{ОГ,C}(t) = k_{Г,C} \exp(-\Lambda t). \quad (5.5д)$$

Если система выключается после возникновения отказа, то считается, что отказы в отключенных элементах происходить не могут. Тогда среднее время восстановления системы будет равно математическому ожиданию продолжительности восстановления совокупности элементов

$$T_{B,C} = \{ T_{B,1} \lambda_1 + T_{B,2} \lambda_2 + \dots + T_{B,m} \lambda_m \} / \{ \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m \}, \quad (5.6a)$$

где величина $\lambda_i = 1/T_{O,i}$ – соответствует параметру потока отказов i -го элемента. Зная коэффициент готовности и среднее время восстановления можно определить среднее время наработки на отказ системы

$$T_{O,C} = T_{B,C} k_{Г,C} / (1 - k_{Г,C}). \quad (5.6б)$$

В нормативных документах для систем электросвязи и автоматизированных систем управления указывается требуемое значение коэффициента готовности и допустимое среднее время восстановления системы [10]. Коэффициент готовности обычно задается не менее 0,99999, среднее время восстановления составляет не более 0,5 ч. В таком случае задача заключается в определении показателей надежности отдельных элементов. Подобные задачи решаются, исходя из принципа равной надежности элементов или распределения надежности по элементам с учетом коэффициентов их сложности.