

8 СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

Конечной целью расчета надежности технических устройств является, как правило, выявление оптимальных конструктивных решений и параметров, определение наиболее эффективных режимов эксплуатации, стратегии текущего технического обслуживания и ремонтов. Решение этих задач возможно только на основании анализа надежности.

8.1 АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Технические объекты, как правило, – сложные системы, состоящие из отдельных узлов, деталей агрегатов, систем контроля, управления и т.д. (например, в современном автомобиле порядка 10 тыс. деталей). *Техническая система* – совокупность технических устройств (элементов), предназначенных для выполнения определенной функции или нескольких функций. Соответственно, *элемент* – составная часть системы.

Расчленение технической системы на элементы достаточно условно и зависит от постановки задачи. Например, при определении работоспособности автоматизированной станочной линии элементами могут считаться отдельные станки, транспортные и загрузочные устройства и другие сложные технические объекты. Станки и устройства также могут считаться техническими системами и при необходимости могут быть разбиты на элементы – узлы, которые, в свою очередь, – на детали, детали – на отдельные части.

Расчет показателей надежности технических систем осуществляется в рамках системного анализа.

8.1.1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Системный анализ надежности – общее методологическое направление, основная задача которого состоит в разработке методов разработки и комплексного исследования сложных технических систем различных типов. Системный подход в исследовании надежности технических объектов предполагает, что взаимодействие составных частей (элементов) технического объекта приводит к появлению у этого объекта принципиально новых свойств, которые не присущи невзаимосвязанным элементам.

Сущность системного анализа при исследовании надежности заключается в инженерном анализе отказов объекта и причин их возникновения, выборе организационно-технических и технологических способов повышения надежности, методов прогнозирования, расчета и оптимизации показателей надежности, методов синтеза высоконадежных технических систем.

Системный анализ надежности технических объектов включает, как правило, следующие *стадии*:

- анализ технической системы как объекта исследования надежности;
- разработка математической модели надежности системы; анализ надежности системы;
- расчет показателей надежности;
- выбор способов обеспечения и повышения надежности;
- оптимизация показателей надежности или синтез технической системы с заданными показателями надежности;
- разработка организационных и инженерно-технологических мероприятий по повышению эффективности функционирования технической системы.

Анализ технической системы как объекта исследования надежности в свою очередь проводится в несколько этапов:

- декомпозиция технической системы на отдельные подсистемы и элементы;
- выбор критериев эффективности функционирования элементов, подсистем и системы в целом;
- расчет и оптимизация параметров функционирования элементов, подсистем и системы в целом (конструктивные, технологические и проектные расчеты);
- инженерно-технологический анализ отказов элементов, подсистем и системы в целом (выявление характера и признаков, причин возникновения отказов, изучения влияния отказов элементов и подсистем на работоспособность системы в целом, расчет показателей надежности элементов и подсистем).

Математическая модель надежности системы – формальное математическое описание ее функционирования с определенной степенью приближения. Математические модели разделяются на два больших класса: символические (символьные) и топологические (структурные).

Символические модели надежности – это совокупность алгебраических, интегральных, дифференциальных или логических уравнений, позволяющих определить вероятность нахождения системы в каждом из возможных состояний, а также показатели надежности системы в зависимости от показателей надежности ее элементов, их взаимодействия друг с другом, воздействия внешних факторов, условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонтов.

Топологические модели надежности – наглядные графические отображения влияния отказов элементов на работоспособность системы в целом, которые позволяют определять показатели надежности системы с учетом особенностей ее структуры, взаимодействия элементов, эксплуатации и технического обслуживания. Топологические модели надежности составляются в виде

структурных (структурно-логических) схем, ориентированных или неориентированных графов.

Выбор вида модели надежности (или сочетания моделей) зависит от структуры технической системы, количества и особенностей взаимодействия элементов друг с другом, принятой системы технического обслуживания и ремонта, многих других параметров. Чаще всего используются комбинированные математические модели, сочетающие достоинства символических и топологических моделей.

Анализ надежности системы обычно проводится по ее структурно-логической схеме, составленной на основании структурно-логического анализа.

8.1.2 СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Структурно-логический анализ позволяет оценить основные характеристики надежности технического объекта, исходя из особенностей его конструкции, характера функционирования и взаимодействия составных частей, их влияния на надежность объекта в целом.

При определении структуры технической системы в первую очередь необходимо оценить влияние каждого элемента и его работоспособности на работоспособность системы в целом.

С этой точки зрения целесообразно разделить все элементы системы на четыре группы:

1. Элементы, отказ которых практически не влияет на работоспособность системы (например, деформация кожуха, изменение окраски поверхности и т.д.). Отказы таких элементов могут рассматриваться отдельно, тем более, что чаще всего имеют место не отказы таких элементов, а дефекты или повреждения, не влияющие на работоспособность.
2. Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не изменяется и вероятность их безотказной работы близка к единице (станины и корпусные детали, малонагруженные элементы с большим запасом прочности и т.д.).
3. Элементы, ремонт или регулировка которых возможны в процессе работы или во время плановых остановок (подналадка или замена режущего инструмента на станке, регулировка холостого хода карбюратора и т.д.).
4. Элементы, отказ которых сам по себе или в сочетании с отказами других элементов приводит к отказу системы.

При анализе надежности системы имеет смысл включать в рассмотрение элементы только последней группы.

При расчете вероятности безотказной работы и других характеристик надежности целесообразно воспользоваться *структурно-логическими схемами надежности*, в которых учитываются взаимосвязь элементов друг с другом и их влияние на работоспособность системы.

Большинство технических систем может быть представлено в виде совокупности элементов, соединенных друг с другом последовательно или параллельно. Основным критерием для определения вида соединения элементов является влияние их отказа на работоспособность всей системы.

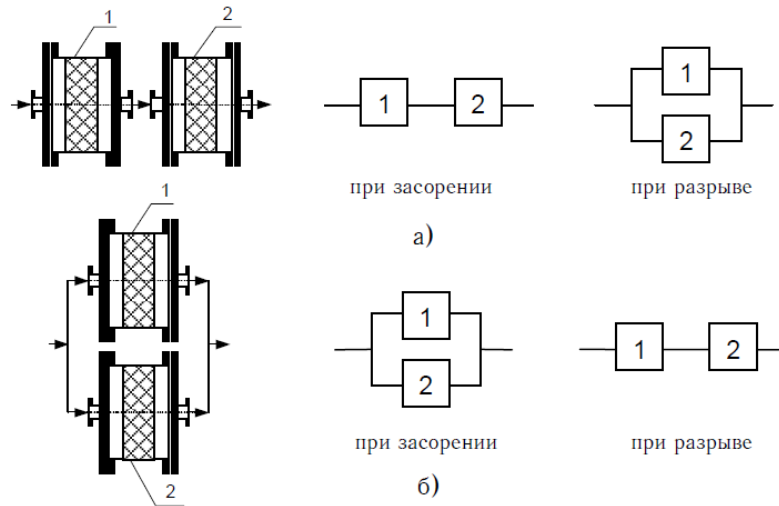
Последовательным (основным) считается соединение, при котором отказ элемента приводит к отказу системы. *Параллельным* считается соединение, при котором отказ элемента не приводит к отказу системы, отказ происходит только в случае отказа всех элементов.

Наглядное представление о последовательном соединении дает, например, схема технологической линии, в которой происходит последовательная переработка сырья в готовый продукт. Ряд единиц оборудования такой линии (машины, станки, аппараты, трубопроводы, конвейеры и т.д.) образует цепочку элементов с последовательным соединением. Если же на некоторых участках предусмотрена переработка полупродуктов на нескольких единицах оборудования, то такие элементы могут считаться соединенными параллельно.

Однако не всегда структурная схема надежности аналогична конструктивной схеме. Например, подшипники на валу редуктора работают параллельно друг с другом, однако выход из строя любого из них приводит к отказу системы и с точки зрения надежности они образуют последовательное соединение. Аналогично три параллельных насоса, обеспечивающих подачу жидкости в гидравлическую систему, с точки зрения надежности соединены последовательно, если отказ одного из них приведет к ее недостаточному расходу.

Кроме того, на структуру схемы надежности оказывает влияние и вид или причины возникновения отказов.

Так, например, в различных гидравлических системах и системах подачи топлива для повышения пропускной способности, долговечности или надежности используется параллельное или последовательное соединение фильтрующих элементов. Отказ фильтрующего элемента обычно происходит по двум основным причинам – засорения или разрыва фильтрующей перегородки.



В случае засорения структурная схема соответствует конструктивной схеме системы (при последовательном соединении засорение любого из фильтров приводит к отказу системы, при параллельном соединении в случае засорения одного из фильтров весь поток жидкости пойдет через второй фильтр и отказа системы не произойдет, хотя ее характеристики изменятся). В случае отказа из-за разрыва структурная схема противоположна конструктивной (при параллельном соединении разрыв перегородки в любом из фильтров приведет к прорыву неочищенной жидкости, т.е. в системе произойдет отказ, при последовательном соединении система останется работоспособной, хотя ее параметры изменятся).

Соответственно, в зависимости от схемы соединения и рассматриваемого вида отказа параметры надежности рассчитываются по разным моделям.

При анализе надежности технической системы, как правило, выполняются следующие операции:

1. Анализируются устройство и выполняемые системой и ее составными частями функции, а также взаимосвязь составных частей.
2. Формулируется содержание понятий «безотказная работа» и «отказ».
3. Определяются все возможные отказы системы и ее составных частей, их причины и возможные последствия.
4. Оценивается влияние отказов составных частей на работоспособность системы.
5. Система разделяется на элементы, показатели надежности которых известны.
6. Составляется графическая модель безотказной работы системы - ее структурная схема надежности.
7. По структурной схеме составляются расчетные зависимости для определения вероятности безотказной работы и других показателей надежности системы с использованием данных по надежности ее элементов.

Анализ надежности может проводиться на различных этапах жизненного цикла технического объекта: при проектировании, изготовлении, испытаниях, монтаже, запуске, эксплуатации и т.д.

В зависимости от поставленной задачи на основании результатов расчета характеристик надежности, а также их изменения во времени делаются выводы и принимаются соответствующие решения: о необходимости изменения или доработки технических решений, о необходимости повышении надежности, о возможности постановки объекта на производство или снятии с производства, об установлении графика планово-предупредительных работ и ремонтов или его изменении, о необходимых номенклатуре и количестве запасных частей, узлов и деталей, о возможности дальнейшей эксплуатации, о модернизации, о списании и т.д.

8.2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Задача расчета надежности сложных технических систем сводится, как правило, к определению основных показателей безотказности и долговечности при известных режимах функционирования и значениях показателей надежности элементов.

Расчет надежности технических систем по безотказности обычно проводится в предположении, что вся система и каждый ее элемент могут находиться в одном из двух возможных состояний – работоспособном и неработоспособном, и отказы элементов независимы друг от друга. Состояние системы определяется состоянием ее элементов и их сочетанием.

Поэтому теоретически возможно расчет безотказности любой системы свести к перебору всех возможных комбинаций состояний элементов, определению вероятности каждого из них и сложению вероятностей работоспособных состояний системы. Такой метод (*метод прямого перебора*) практически универсален и может использоваться при расчете любых технических систем. Однако при достаточно большом количестве элементов системы n такой путь становится нереальным из-за большого объема вычислений (если число элементов системы $n=10$, число возможных состояний системы составляет $2^n=1024$, при $n=20$ превышает 10^6 , при $n=30$ – более 10^9).

Поэтому чаще всего целесообразно использовать более эффективные и экономичные методы расчета, не связанные с большим объемом вычислений.

Для расчета показателей надежности сложных технических систем используются методы, связанные с перечислением элементарных событий (метод прямого перебора и комбинаторный метод), топологические и структурно-логические методы, основанные на структурно-логическом анализе системы (методы минимальных путей и минимальных сечений, разложения относительно особого элемента, методы с использованием графов состояний и деревьев отказов и др.), а также методы статистического моделирования.

8.2.1 СИСТЕМЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Для расчета надежности системы с последовательным соединением используют теорему умножения вероятностей. Для безотказной работы системы с последовательным соединением элементов в течение некоторой наработки t необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее элементов работал безотказно в течение этой наработки. Если отказы элементов независимы друг от друга, то вероятность безотказной работы системы $P(t)$ равна произведению вероятностей безотказной работы элементов $p_i(t)$:

$$P = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (8.1)$$

Соответственно вероятность отказа такой системы

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \quad (8.2)$$

Если система состоит из равнонадежных элементов ($p_i = p$), то на основании формул (8.1) и (8.2)

$$P = p^n, \quad Q = 1 - (1 - p)^n. \quad (8.3)$$

Анализ формул (8.1) и (8.3) показывает, что даже при сравнительно высокой надежности элементов надежность системы с последовательным соединением оказывается довольно низкой.

Например, при $p = 0,95$ и $n = 10$ ($P = 0,60$) и быстро уменьшается при увеличении числа элементов (при $n = 15$ $P = 0,46$, при $n = 20$ $P = 0,36$).

Если в системе с последовательным соединением выделить самый ненадежный элемент k ($p_k = \min\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$), то на основании формулы (8.1) можно записать

$$P = p_k \cdot \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n p_i \leq p_k \quad (8.4)$$

Так как все сомножители в правой части формулы не превышают 1, то их произведение тем более не может быть больше 1. Следовательно, вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением не может быть выше вероятности безотказной работы самого ненадежного из ее элементов («хуже худшего»), и из ненадежных элементов нельзя создать высоконадежную систему с последовательным соединением.

Если элементы работают в периоде нормальной эксплуатации и их вероятности безотказной работы p_i подчиняются экспоненциальному закону

$$p_i = \exp(-\lambda_i t), \quad (8.5)$$

где $\lambda_i = \text{const}$ – интенсивности отказов элементов), то на основании формулы (8.1) можно получить

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right)\right] = \exp(-\Lambda t), \quad (8.6)$$

где $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \text{const}$ – интенсивность отказов системы.

Таким образом, в этом случае вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением элементов также подчиняется экспоненциальному закону и интенсивность отказов системы (число отказов за единицу наработки) равна сумме интенсивностей отказов ее элементов.

Для периода нормальной эксплуатации средняя наработка элемента

$$t_i = 1/\lambda_i.$$

Тогда средняя наработка системы

$$T = \frac{1}{\Lambda} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)^{-1} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i}\right)^{-1}. \quad (8.7)$$

Из формулы (8.6) можно получить формулу для γ -процентной наработки системы, в течение которой отказ не наступит с вероятностью γ :

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\Lambda} = -T \ln P_\gamma. \quad (8.8)$$

Очевидно, для системы с равнонадежными элементами

$$\Lambda = n\lambda, \quad T = \frac{t}{n}, \quad (8.9)$$

т.е. интенсивность отказов системы в n раз больше, а средняя наработка в n раз меньше, чем у элементов.

8.2.2 СИСТЕМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Системой с параллельным соединением элементов называется система, отказ которой произойдет только в случае отказа всех ее элементов. Такие системы характерны для технических объектов, в которых элементы дублируются или резервируются, т.е. параллельное соединение используется как метод повышения надежности системы. Однако такие системы встречаются и самостоятельно (например, система двигателей четырехмоторного самолета или задний мост грузового автомобиля с двумя колесами на каждой полуоси).

Для отказа системы с параллельным соединением элементов в течение наработки t необходимо и достаточно, чтобы все ее элементы отказали в течение этой наработки. Если отказы элементов независимы друг от друга, то по теореме умножения вероятностей вероятность отказа системы равна произведению вероятностей отказа ее элементов:

$$Q = q_1 q_2 \cdots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (8.10)$$

Соответственно вероятность безотказной работы такой системы

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i) \quad (8.11)$$

Если система состоит из равнонадежных элементов ($p_i = p$), то

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n. \quad (7.12)$$

Надежность системы с параллельным соединением повышается при увеличении числа элементов, например, при $p = 0,9$ и $n = 2$ $P = 0,99$, при $n = 3$ $P = 0,999$.

Если в системе выделить самый надежный элемент k ($q_k = \min\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$), то на основании формулы (8.10) можно записать

$$Q = q_k \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n q_i \leq q_k, \quad (8.13)$$

т.е. вероятность отказа системы с параллельным соединением не может быть выше вероятности отказа самого надежного из ее элементов («лучше лучшего»), и даже из сравнительно ненадежных элементов можно создать вполне надежную систему.

При экспоненциальном законе распределения (8.6) формула (8.12) принимает вид

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n. \quad (8.14)$$

Среднее время безотказной работы системы

$$T = \int_0^{\infty} P dt = \int_0^{\infty} \{1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n\} dt. \quad (8.15)$$

После интегрирования можно получить

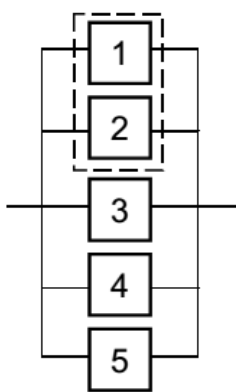
$$T = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = t \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}. \quad (8.16)$$

Таким образом, средняя наработка на отказ системы с параллельным соединением элементов больше средней наработки на отказ ее элементов (например, при $n = 2$ $T = 1,5t$, при $n = 3$ $T = 1,83t$).

8.2.3 МАЖОРИТАРНЫЕ СИСТЕМЫ

Мажоритарную систему (систему « m из n » или «*схему голосования*») можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов.

Мажоритарные системы часто встречаются в электрических и радиосхемах, системах управления, технологических линиях, гидро- и пневмосистемах и т.д., а также при структурном резервировании.



На рисунке представлена мажоритарная система «2 из 5», работоспособная тогда, когда из ее пяти элементов работоспособны любые два, три, четыре или все пять (на схеме пунктирным контуром первые два элемента обведены условно, все пять элементов равнозначны).

Для расчета надежности мажоритарных систем могут применяться различные методы.

При небольшом количестве элементов можно воспользоваться *методом прямого перебора*, который заключается в определении работоспособности каждого из всех возможных состояний системы при различных сочетаниях работоспособных и неработоспособных элементов.

Также можно воспользоваться *комбинаторным методом (методом перечисляющих производящих функций)*. Вероятность события, при котором из общего количества элементов n работоспособность сохраняют k элементов (перечисляющая производящая функция), составляет

$$P_k = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}, \quad (8.18)$$

где C_n^k – биномиальный коэффициент из n по k :

$$C_n^k = \frac{n!}{k! (n - k)!}. \quad (8.19)$$

Если для сохранения работоспособности системы необходимо, чтобы работоспособность сохраняли не менее m элементов из n (т.е. $k \geq m$), то по

теореме сложения вероятностей вероятность безотказной работы равна сумме вероятностей работоспособных состояний:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (8.20)$$

Для системы «2 из 5» по формуле (8.20) получим

$$\begin{aligned} P &= C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = \\ &= 10p^2 (1-p)^3 + 10p^3 (1-p)^2 + 5p^4 (1-p) + p^5 = \\ &= 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \end{aligned} \quad (8.21)$$

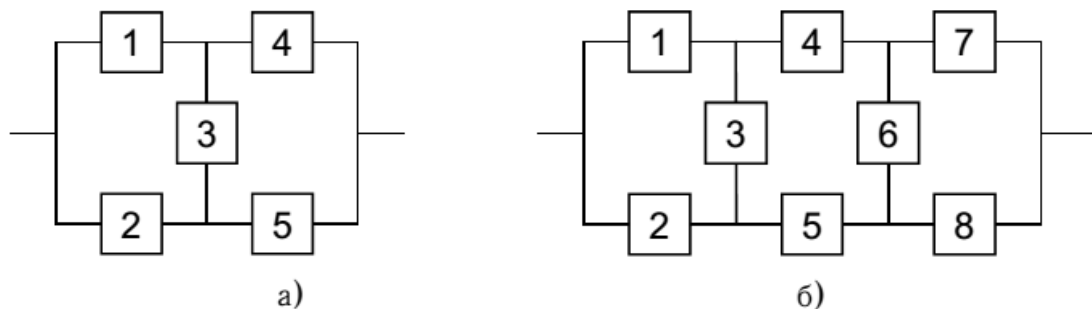
Аналогичным образом можно найти вероятность отказа

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \quad (8.22)$$

8.2.4 Мостиковые системы

Работоспособность *мостиковой системы* определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме.

Например, потеря работоспособности системы, схема которой показана на рисунке *a*, обусловлена одновременным отказом элементов 1 и 2, или 4 и 5, или 1, 3 и 5, или 2, 3 и 4 и т.д., в то же время отказ элементов 1 и 5, или 2 и 4, или 1, 3 и 4, или 2, 3 и 5 к отказу системы не приводит.



Для анализа надежности систем, схемы которых не сводятся к последовательному или параллельному соединению можно воспользоваться *логико-вероятностным методом*, при использовании которого математическая модель системы составляется в терминах алгебры логики. Метод применим к широкому кругу систем с разнообразными связями и сочетаниями элементов, хотя внешне они иногда получаются достаточно громоздкими.

Применение логико-вероятностного метода сводится к составлению формализованной модели в виде формулы алгебры логики, которая определяет условие работоспособности (или, наоборот, отказа) системы – функцию работоспособности (или неработоспособности).

Логико-вероятностный метод можно использовать для расчета вероятности безотказной работы любых структурных схем надежности. Однако при его использовании не всегда удастся составить логическую функцию работоспособности, достаточно точно соответствующую структуре системы.

Кроме того, для сложных систем с большим числом элементов преобразования логических функций становятся очень громоздкими и трудоемкость метода становится практически соизмерима с методом прямого перебора.

Для сокращения объема преобразований при составлении логических формул можно на основании структурной схемы предварительно составить логическую схему системы.

Логические схемы могут составляться двумя методами - минимальных путей и минимальных сечений (при анализе аварийных отказов используются аналогичные им методы минимальных проходных сочетаний и минимальных аварийных сочетаний).

Минимальным путем (или *кратчайшим путем успешного функционирования* или *минимальным проходным сочетанием*) называется последовательный набор работоспособных элементов, который обеспечивает ее работоспособность, а отказ любого из них приводит к ее отказу.

Минимальных путей в системе может быть один или несколько. Очевидно система с последовательным соединением элементов имеет только один минимальный путь, включающий все ее элементы. В системе с параллельным соединением элементов число минимальных путей совпадает с числом элементов и каждый включает один из них.

Метод минимальных путей дает точное значение вероятности безотказной работы только сравнительно простых систем с небольшим числом элементов. Для более сложных систем метод дает только ее приближенную оценку - нижнюю границу.

Для расчета верхней оценки вероятности безотказной работы системы можно использовать метод минимальных сечений (разрезов), в определенном смысле противоположный методу минимальных путей.

Минимальным сечением (или *минимальным сечением отказов, минимальным аварийным сочетанием*) называется последовательный набор неработоспособных элементов, отказ которых приводит к отказу системы, а восстановление работоспособности любого из них - к восстановлению работоспособности системы.

Так же, как и минимальных путей, минимальных сечений в системе может быть одно или несколько. Очевидно система с параллельным соединением элементов имеет только одно минимальное сечение, включающее все ее эле-

менты. В системе с последовательным соединением элементов число минимальных сечений совпадает с числом элементов и каждое сечение включает один из них.

Логические схемы, составленные методами минимальных путей и минимальных сечений, являются графическими аналогами формул алгебры логики - функций работоспособности и неработоспособности, причем последовательное или параллельное соединение событий в логической схеме соответствует логическому умножению («И») или логическому сложению («ИЛИ») событий. Так, логическая схема метода минимальных путей формулирует условие сохранения работоспособного состояния системы, причем последовательное соединение событий соответствует логическому «И», параллельное - «ИЛИ».

Логическая схема метода минимальных сечений, наоборот, формулирует условия отказа системы, и в ней последовательное соединение соответствует логическому «ИЛИ», а параллельное - логическому «И».

Еще одной графической моделью состояния технической системы и иллюстрацией соответствующей ей формулы алгебры логики (функции неработоспособности) является дерево отказов, которое составляется для анализа надежности и определения вероятности безотказной работы систем дедуктивным методом (*методом дерева отказов*).

В отличие от логико-вероятностного метода, при реализации которого рассматривается влияние состояния каждого элемента на состояние системы в целом (индуктивный подход), дедуктивный метод предполагает анализ неработоспособного состояния системы и причин, которые к нему приводят, т.е. отказов элементов. Условия, при которых возникает отказ системы (завершающее событие), сводится в логическую схему причинно-следственных связей отказов в виде ориентированного графа с ветвящейся структурой – *дерево отказов*.

Структурными элементами дерева являются события, связанные между собой логическими операциями (связками).

Появление и неоявление отказа любого элемента и системы в целом - события, образующие полную совокупность событий. Поэтому вместо дерева отказов можно составить *дерево работоспособности* («*дерево успехов*»). Для получения дерева работоспособности из дерева отказов необходимо заменить в нем все символы «ИЛИ» символами «И», все первичные и результирующие события заменить противоположными (дополнительными) событиями.

По дереву работоспособности можно построить функцию работоспособности и далее рассчитать вероятность безотказной работы системы.

Метод дерева отказов позволяет наглядно представить возможные причины возникновения отказов технических систем и определить способы повышения их надежности. На использовании дерева отказов основана значительная часть аналитических методов расчета надежности и анализа риска.

8.2.5 КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Большинство систем имеют сложную *комбинированную* структуру, одни из элементов которой образуют последовательное соединение, другие - параллельное, некоторые образуют мажоритарные или мостиковые подсистемы. Для расчета надежности таких систем целесообразно предварительно произвести декомпозицию системы, разбив ее на блоки (подсистемы), методика расчета надежности которых известна.

Затем эти подсистемы в схеме надежности заменяются элементами (квазиэлементами) с вероятностями безотказной работы, равными вероятностям безотказной работы этих подсистем. При необходимости эту процедуру можно произвести несколько раз до тех пор, пока оставшиеся квазиэлементы не образуют систему, методика расчета надежности которой известна.

Эта методика носит название *метода свертки* или *метода эквивалентных преобразований*. При ее использовании число элементов исходной схемы очень мало влияет на сложность проведения расчетов, но определяет число ее преобразований.

8.2.6 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Для оценки надежности систем, предназначенных для выполнения нескольких функций (*многофункциональных систем*), обычно приходится определять вероятность безотказной работы систем по каждой функции отдельно. При этом для каждой функции часто приходится составлять свою структурную схему надежности.