

Ю.В. Степкина

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие



**Тольятти
ТГУ
2011**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Электротехнический факультет
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

Ю.В. Степкина

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ
ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЁЖНОСТИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Учебное пособие

Тольятти
ТГУ
2011

УДК 621.311.2:621.313/316

ББК 31.277.1

С79

Рецензенты:

заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор
Самарского государственного технического университета *Л.С. Зимин*;
д.т.н., доцент, профессор Тольяттинского государственного
университета *А.А. Кувшинов*.

С79 Степкина, Ю.В. Системный анализ и принятие решений по повышению надежности систем электроснабжения : учеб. пособие / Ю.В. Степкина. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 71 с.

В учебном пособии изложены основные положения теории надежности и их практическое использование при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения, теория системного анализа, изучение которой позволит провести системный анализ возникшей проблемы с целью выработки рекомендаций по повышению надежности схем электроснабжения.

Пособие предназначено для подготовки магистров по направлениям магистратуры 140600.68 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплинам «Надежность систем электроснабжения» и «Системный анализ результатов расчетов и принятие решений по повышению надежности систем электроснабжения».

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2011

ВВЕДЕНИЕ

Системный анализ и моделирование основных процессов в технике особенно актуальны на нынешнем этапе развития. В сложных современных системах на выбор решений влияет большое количество факторов. Часть из них поддается количественному анализу, расчету, другие не имеют достаточной теоретической базы для количественного описания. Это создает неопределенность в выборе решений. Чем больше факторов, не поддающихся количественному анализу, тем больше вероятность неправильных решений и их отрицательных последствий. Среди всех факторов надежность занимает особое место. Довольно трудно назвать решение, при принятии которого не требовались бы знания о надежности. В настоящее время обеспечение надежности становится одной из острых проблем как при эксплуатации, так и при проектировании различных систем. Растет число исследований, связанных с решением задач прогнозирования надежности элементов и оценки надежности сложных систем. Особенно большое внимание уделяется решению проблемы надежности в энергетике.

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения основных понятий теории надежности, методов выбора и обоснования количественных показателей надежности, методов расчета надежности систем электроснабжения, а также основных принципов и возможностей системного анализа, получения представления об организации системного исследования и методологии его проведения, о математическом аппарате, используемом для формализации задач принятия решений.

1. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Основные термины и определения

Основные термины и определения, применяемые для анализа и синтеза надежности в электроэнергетике, приведены в нормативных документах и рекомендациях [1], [2], [13], [15].

Надежность согласно [1] – «свойство объекта выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования». Применительно к электрическим системам – бесперебойное снабжение электроэнергией в пределах допустимых показателей ее качества и исключение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

Надежность является комплексным свойством объекта, которое в зависимости от назначения объекта, условий его эксплуатации, рассматриваемого территориального или временного уровня иерархии управления может включать несколько единичных свойств. Основными единичными свойствами объектов энергетики являются: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, устойчивая способность, режимная управляемость, живучесть и безопасность.

Работоспособное состояние (работоспособность) – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции в заданном объеме.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности, т. е. в переходе объекта с одного уровня работоспособности или функционирования на другой, более низкий или в полностью неработоспособное состояние. После появления отказа эксплуатационные параметры технического устройства выходят за заданные пределы.

В зависимости от характера внешнего проявления, причины и т. д. различают большое число видов отказов. Одна из возможных классификаций отказов представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

| Признак деления | Вид (название) отказа | |
|---|-----------------------|-------------|
| Степень потери работоспособности | Полный | Частичный |
| Ход процесса изменения параметров до отказа | Внезапный | Постепенный |
| Зависимость от других отказов | Зависимый | Независимый |

| Признак деления | Вид (название) отказа | | |
|---|-----------------------|-------------------|---|
| Характер отказа с точки зрения его устранения | Устойчивый | | |
| | Переменяющийся (сбой) | Самоустраняющийся | |
| Характер неисправности, вносимой в электроцепь | Обрыв | | Короткое замыкание |
| Этап, на котором допущены погрешности, приведшие к отказу | Конструкционный | Технологический | Эксплуатационный |
| Возможность выявления | Явный | | Неявный |
| Природа происхождения | Естественный | | Искусственный (отказ, вызываемый намеренно) |

Другая классификация отказов электрооборудования основывается на их объективных и субъективных причинах. На рис. 1.1 приведена примерная классификация причин отказов электрооборудования по [10].

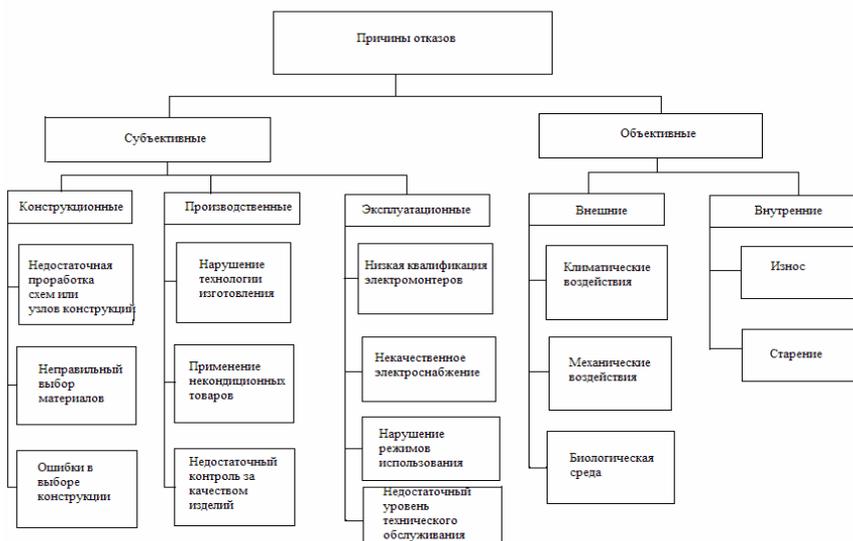


Рис. 1.1. Классификация причин отказов

Надежностные процессы в объекте могут быть структурированы так, как показано на рис. 1.2 [12].

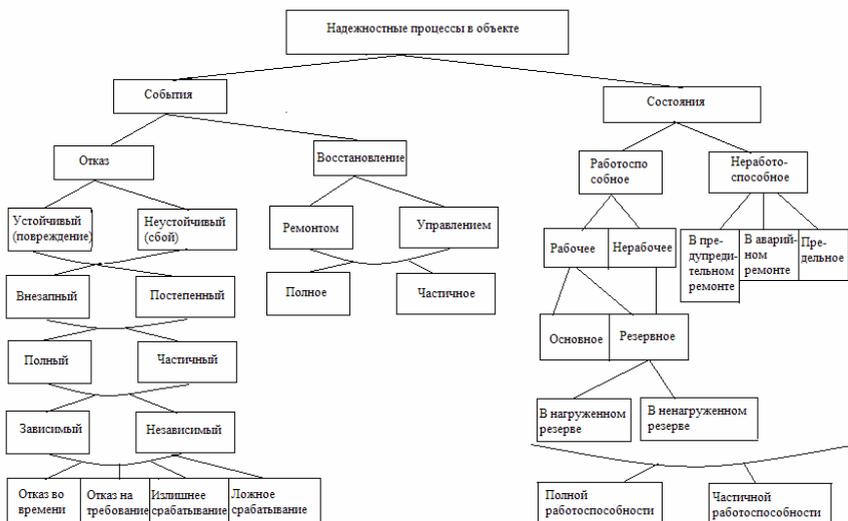


Рис. 1.2. Надежные процессы в объекте

Надежность устройства чаще всего характеризуется несколькими количественными параметрами, выбор которых зависит от назначения и условий эксплуатации технического устройства.

1.2. Показатели надежности элементов

Показателем надежности называется количественная характеристика надежности. Показатели надежности подразделяются на единичные, характеризующие одно свойство, и комплексные, характеризующие несколько свойств. Единичные применяются в основном для характеристики отдельных конструктивных элементов, комплексные – для узлов нагрузки и систем в целом.

Рассматриваемые ниже показатели применяются как для оценки надежности невозстанавливаемых (одноразового использования), так и подлежащих ремонту, т. е. восстанавливаемых объектов до появления первого отказа.

Причиной отказа любого технического устройства или системы является, как правило, отказ одного или нескольких элементов. Рассмотрим, как оценивается и рассчитывается безотказность отдельного элемента [2], [11], [18].

Основной количественной характеристикой безотказности является вероятность безотказной работы. *Вероятность безотказной работы* $P(t)$ системы (элемента) – вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ система (элемент) не откажут.

Статистически $P^*(t)$ определяется как отношение числа элементов $N(t)$, безотказно проработавших до момента t , к первоначальному числу наблюдаемых элементов $N(0)$:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N(0)}. \quad (1.1)$$

Вероятность отказа $Q(t)$ – вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ произойдет отказ.

Статистическая оценка $Q^*(t)$ – это отношение числа элементов $n(0, t)$, отказавших к моменту времени t , к числу элементов $N(0)$, исправных в начальный момент времени $t = 0$:

$$Q^*(t) = \frac{n(0, t)}{N(0)}. \quad (1.2)$$

Таким образом, всегда имеет место соотношение

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (1.3)$$

так как сумма вероятностей несовместных событий равна единице.

Частота отказов $a(t)$ – плотность распределения случайной величины (плотность вероятности отказа)

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.4)$$

Статистически частота отказов – это отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу испытываемых элементов при условии, что все вышедшие из строя элементы не восстанавливаются, т. е.

$$a^*(t) = \frac{n(0, t)}{N(0) \cdot \Delta t}, \quad (1.5)$$

где $n(0, t)$ – число элементов, отказавших к моменту времени t ; $N(0)$ – число элементов, поставленных на испытание.

Точность статистической оценки (1.5) возрастает с увеличением первоначального числа наблюдаемых элементов и уменьшением временного интервала Δt .

Частота отказов, вероятность безотказной работы и вероятность отказа связаны следующими зависимостями:

$$P(t) = \int_t^{\infty} a(t) dt ; \quad (1.6)$$

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt . \quad (1.7)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ — условная вероятность отказа после момента t за единицу времени Δt при условии, что до момента t отказа элемента не было.

Интенсивность отказов есть отношение скорости изменения вероятности отказа элемента к вероятности его безотказной работы в данный момент времени

$$\lambda(t) = \frac{dQ(t)}{P(t)} = \frac{d[1 - P(t)]}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} . \quad (1.8)$$

Статистически $\lambda^*(t)$ — это отношение числа элементов, отказавших в интервале времени Δt , к среднему числу элементов N_{CP} , исправно работающих в данный интервал времени

$$\lambda^*(t) = \frac{n(0, t)}{\Delta t \cdot N_{CP}} , \quad (1.9)$$

где $N_{CP} = \frac{N(t) + N(t + \Delta t)}{2}$ — число элементов, сохранивших работоспособность к моменту t , попадающему в середину интервала Δt .

Интенсивность отказов связана с частотой отказов и вероятностью безотказной работы:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} . \quad (1.10)$$

Так как $P(t) \leq 1$, то всегда выполняется соотношение $\lambda(t) \geq a(t)$.

Отметим важную особенность, вытекающую из формулы (1.10) для высоконадежных элементов и систем: если $P(t) \geq 0,99$, то

$$a(t) \approx \lambda(t) . \quad (1.11)$$

Поэтому в практических расчетах возможна при указанном условии взаимная замена $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Типичная функция интенсивности отказов во времени (в течение срока службы объекта) имеет U -образный характер (рис. 1.3).

В начальный период I преобладают приработочные отказы, которые возникают по вине проектировщиков, конструкторов и изготовителей. После него наступает наиболее продолжительный период нормальной

эксплуатации II, в котором на объект воздействуют случайные факторы. Последние вызывают внезапные отказы, интенсивность которых в период нормальной эксплуатации практически не зависит от времени.

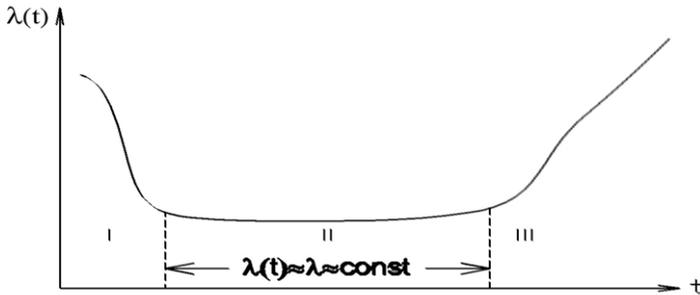


Рис. 1.3. Функция интенсивности отказов

В период старения и износа III в основном имеют место постепенные отказы, возникающие вследствие накопления ухудшений физико-химических свойств объекта, что делает его дальнейшую эксплуатацию нецелесообразной.

Среднее время безотказной работы T – это математическое ожидание случайной величины t . В теории вероятностей математическое ожидание случайной величины определяется:

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)x dx, \quad (1.12)$$

в этом случае случайная величина x – время t , а плотность распределения – это частота отказов $a(t)$. Тогда

$$T = \int_0^{\infty} ta(t)dt. \quad (1.13)$$

Статистически среднее время безотказной работы определяется как

$$T^* = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_i}{N(0)}, \quad (1.14)$$

где t_i – время работы i -го элемента до отказа; $N(0)$ – число испытываемых элементов.

Интегрируя выражение (1.8), можно получить еще одну связь между двумя количественными характеристиками надежности, называемую *общей формулой вероятности безотказной работы*:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} . \quad (1.15)$$

Установим связь между временем безотказной работы T и вероятностью $P(t)$:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt . \quad (1.16)$$

Рассмотренные критерии надежности позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых устройств, а также восстанавливаемых — до первого отказа.

1.3. Законы распределения, используемые в теории надежности

На основе анализа статистических данных об отказах элементов систем электроснабжения можно выделить три периода эксплуатации элементов и систем, каждый из которых характеризуется определенными законами распределения случайных величин.

Наиболее часто рассматривают количественные показатели надежности в период нормальной эксплуатации, когда на элемент воздействуют случайные факторы и отказы происходят в основном по причине превышения воздействующими факторами расчетных параметров элемента [8], [16], [21].

В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически неизменна, т. е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$, поэтому показатели надежности описывают экспоненциальным законом распределения. Экспоненциальное распределение имеет следующую плотность распределения вероятностей [6]:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{при } x \geq 0 \\ 0, & \text{при } x < 0 \end{cases} . \quad (1.17)$$

Основные показатели надежности в этот период эксплуатации: вероятность безотказной работы в течение времени t

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (1.18)$$

вероятность отказа в течение времени t

$$Q(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (1.19)$$

частота отказов

$$a(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (1.20)$$

интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const}, \quad (1.21)$$

среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.22)$$

1.4. Показатели надежности восстанавливаемых элементов

В технике широко применяются восстанавливаемые (ремонтируемые) устройства и элементы. В общем случае один цикл «жизни» восстанавливаемого элемента включает в себя рабочий период, когда элемент работоспособен, и период восстановления, когда элемент ремонтируется. После ремонта элемент вновь включается в работу и начинается новый цикл его жизни. Восстановление элемента может выражаться как в его профилактическом обслуживании, так и в ремонтах.

Процесс восстановления можно характеризовать следующими показателями.

Вероятность восстановления — вероятность того, что отказавший элемент будет восстановлен в течение заданного времени t , т. е. вероятность своевременного завершения ремонта.

Вероятность невосстановления (несвоевременного завершения ремонта) — вероятность того, что отказавший элемент не будет восстановлен в течение заданного времени t .

Частота восстановления — производная от вероятности восстановления.

Интенсивность восстановления $\mu(t)$ — условная вероятность восстановления после момента t за единицу времени Δt при условии, что до момента t восстановления элемента не произошло.

Численные значения интенсивности восстановления и интенсивности отказов сведены в справочные таблицы по видам оборудования и ремонтов.

Среднее время восстановления T_B — при экспоненциальном распределении времени восстановления, когда интенсивность восстановления $\mu = \text{const}$, аналогично имеем соотношение

$$T_B = \frac{1}{\mu}, \quad (1.23)$$

т. е. среднее время восстановления численно равно средней по множеству однотипных элементов (объектов) продолжительности восстановления, приходящейся на один объект. Поскольку $\mu = \text{const}$, то и $T_B = \text{const}$.

Статистически среднее время восстановления равно

$$T_B^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_B(0)} t_{Bi}}{n}, \quad (1.24)$$

где t_{Bi} — длительность восстановления i -го элемента (объекта), n — число отказов данного объекта; $N_B(0)$ — число восстановленных элементов.

Параметр потока отказов $\omega(t)$ — математическое ожидание числа отказов, происшедших за единицу времени, начиная с момента t при условии, что все элементы, вышедшие из строя, заменяются работоспособными, т. е. число наблюдаемых элементов сохраняется одинаковым в процессе эксплуатации.

Из статистических данных параметр потока отказов $\omega^*(t)$ определяется по формуле

$$\omega^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}, \quad (1.25)$$

где N , $n(\Delta t)$ — соответственно общее количество элементов, поставленных на испытание, и число элементов, отказавших за интервал времени Δt .

Для экспоненциального закона надежности интенсивность и параметр потока отказов не зависят от времени и совпадают, т. е.

$$\lambda(t) = \omega(t) = \lambda = \omega = \text{const}. \quad (1.26)$$

Для оценки нескольких свойств надежности используются комплексные показатели, приведенные ниже.

Коэффициент готовности K_r — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t .

Для определения величины K_r отдельного элемента используется следующая статистическая оценка:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Pi}}{\sum_{i=1}^n t_{Pi} + \sum_{i=1}^n t_{Bi}}, \quad (1.27)$$

где t_{Pi} — i -й интервал времени исправной работы элемента; t_{Bi} — i -й ин-

тервал времени восстановления элемента после i -го отказа; n – число отказов.

Разделив знаменатель выражения (1.27) на число отказов n , происшедших за рассматриваемое время, получим следующее выражение:

$$K_G = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{T}_B}. \quad (1.28)$$

Коэффициент вынужденного простоя K_{II} – вероятность того, что в произвольный момент времени t объект будет в неработоспособном состоянии:

$$K_{II} = 1 - K_G = \frac{\bar{T}_B}{\bar{T} + \bar{T}_B}. \quad (1.29)$$

Коэффициент технического использования $K_{ТИ}$ – отношение математического ожидания времени пребывания объекта в рабочем состоянии к суммарному времени эксплуатации; учитывает дополнительные преднамеренные отключения элемента, необходимые для проведения планово-предупредительных ремонтов:

$$K_{ТИ} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{T}_B + \bar{T}_{II}}, \quad (1.30)$$

где \bar{T}_{II} – среднее время нахождения элемента в отключенном состоянии для производства планово-предупредительных ремонтов (профилактики).

Коэффициент оперативной готовности $K_{ОГ}$ – вероятность того, что объект работоспособен в произвольный момент времени t и безошибочно проработает в течение заданного времени τ ($t, t + \tau$):

$$K_{ОГ} = K_G P(\tau). \quad (1.31)$$

2. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

2.1. Структурные схемы расчета надежности систем

Технические системы и сложные изделия состоят из отдельных частей или элементов, так или иначе связанных друг с другом или воздействующих друг на друга. Надежность отдельных элементов оказывает влияние на надежность всей системы.

Структурной надежностью называют составляющую, обусловленную структурой системы, т. е. составом элементов, их взаимосвязями, пропускными способностями, без количественного учета режимных особенностей функционирования элементов [15], [19], [20].

В теории надежности соединения элементов различаются в зависимости от того, как надежность отдельных элементов влияет на надежность всего соединения (технической системы). Термином «соединение» обозначается группа или система элементов, связанных друг с другом. Различают три простейших способа соединения элементов: последовательное, параллельное, смешанное. Сначала рассмотрим структурные схемы надежности для невозстанавливаемых элементов.

2.2. Последовательное соединение элементов

Последовательным называется такое соединение элементов в системе, когда отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, т. е. последовательная структура работоспособна, если все ее элементы работоспособны.

Структурная схема последовательного соединения представлена на рис. 2.1.

Последовательное соединение элементов в структурной схеме надежности не всегда совпадает с последовательным соединением элементов в электрической цепи.

Элементы системы будем считать независимыми, т. е. вероятность отказа любого элемента в системе не зависит от вероятности отказа других элементов.

Вероятность безотказной работы технической системы из последовательно соединенных независимых элементов есть произведение вероятностей безотказной работы всех его элементов.

$$P_C(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_i(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (2.1)$$

где $p_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента; n – число элементов.

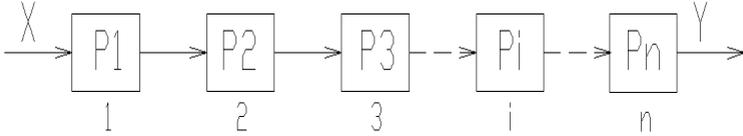


Рис. 2.1. Схема последовательного соединения элементов

Вероятность отказа последовательной структуры

$$Q_C(t) = 1 - P_C(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - q_i(t)], \quad (2.2)$$

где q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Подставив выражение (2.1) в общую формулу (1.15) вероятности безотказной работы, получим

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt}, \quad (2.3)$$

где

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

Если все элементы подчиняются экспоненциальному закону надежности, т. е. $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, то

$$P_C(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t}, \quad (2.5)$$

т. е. вся последовательно соединенная структура также подчиняется экспоненциальному закону надежности, причем

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n.$$

Вероятность безотказной работы системы из n одинаковых элементов

$$P_C(t) = e^{-n\lambda t}, \quad (2.6)$$

среднее время безотказной работы

$$T = \int_0^{\infty} e^{-n\lambda t} dt = \frac{1}{n\lambda} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (2.7)$$

Следовательно, с ростом числа элементов среднее время безотказной работы уменьшается. Его увеличения в последовательной цепи можно

достигнуть только повышением качества элементов или повышением уровня их эксплуатации, т. е. путем снижения интенсивности отказов.

2.3. Параллельное соединение элементов

Параллельным называют такое соединение элементов в структурной схеме технической системы, когда отказ наступает лишь при отказе всех элементов.

Параллельную структуру называют также избыточной или резервированной, поскольку элементов в ней больше, чем это необходимо для ее нормальной работы. При отказе одного или нескольких элементов функция структуры выполняется оставшимися в работе элементами, если последние удовлетворительно выполняют функции отказавших.

Схема замещения (по надежности) системы с параллельной структурой представлена на рис. 2.2.

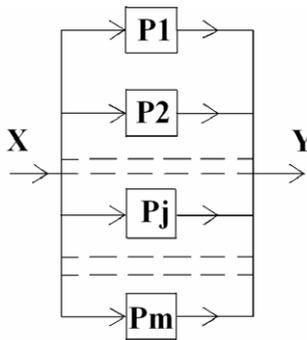


Рис. 2.2. Схема замещения элементов системы с параллельной структурой

Если отказы элементов взаимно независимы, то, исходя из определения, что отказ системы с параллельно соединенными в структурной схеме элементами наступает при отказе одновременно всех элементов (и первого, и второго, и третьего), вероятность отказа системы определится как произведение вероятностей отказов всех её элементов:

$$Q_C(t) = q_1(t)q_2(t)\dots q_j(t)\dots q_m(t) = \prod_{j=1}^m q_j(t). \quad (2.8)$$

Учитывая выражения (1.3) и (1.15), запишем

$$q_j(t) = 1 - p_j(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_j(t) dt}. \quad (2.9)$$

Вероятность безотказной работы системы из m элементов

$$P_C(t) = 1 - Q_C(t) = 1 - \prod_{j=1}^m q_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)]. \quad (2.10)$$

Если надежность элементов системы определяется экспоненциальным законом $\lambda_j(t) = \lambda_j = \text{const}$ $P_j(t) = e^{-\lambda_j t}$, то вероятность безотказной работы системы

$$P_C(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) \dots (1 - e^{-\lambda_m t}) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - e^{-\lambda_j t}). \quad (2.11)$$

Из последнего выражения следует, что функция надежности системы параллельно соединенных элементов с экспоненциальными законами уже не является экспоненциальной.

Если система составлена из m одинаковых элементов с $\lambda_j = \lambda = \text{const}$, то, приняв

$$P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_j(t) = \dots = P_m(t) = P$$

и

$$q_1(t) = q_2(t) = \dots = q_j(t) = \dots = q_m(t) = q,$$

имеем

$$Q_C = q^m = (1 - e^{-\lambda t})^m \quad (2.12)$$

и

$$P_C = 1 - q^m = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m. \quad (2.13)$$

Среднее время безотказной работы системы в этом случае

$$T = \int_0^{\infty} P_C(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^m] dt. \quad (2.14)$$

Для взятия последнего интеграла воспользуемся подстановкой $1 - e^{-\lambda t} = x$, тогда $dx = \lambda e^{-\lambda t} dt$, то есть $dt = \frac{dx}{\lambda e^{-\lambda t}} = \frac{dx}{\lambda(1-x)}$.

Очевидно, что при $t = 0$, $x = 0$ и при $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow 1$.

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{(1-x^m)}{(1-x)} dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (1+x+x^2+\dots+x^{m-1}) dx = \\ &= \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \dots + \frac{1}{m} \right). \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.4. Надежность систем при постоянном общем резервировании

При *постоянном резервировании* резервные элементы участвуют в работе объекта наравне с основными [12], [13]. В случае отказа основного элемента не требуется специальных устройств, вводящих

в действие резервный элемент, поскольку он включается в работу одновременно с основным. Примером постоянного резервирования могут быть две линии электропередач, питающие одно промышленное предприятие.

При общем резервировании система резервируется в целом (рис. 2.3).

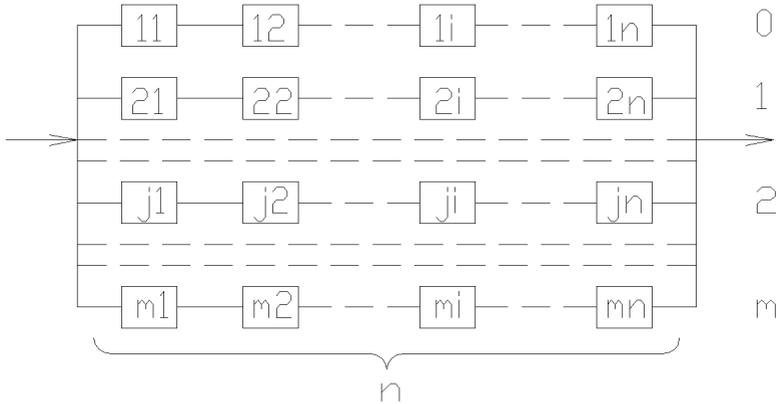


Рис. 2.3. Схема постоянного общего резервирования

Вероятность безотказности работы основной и каждой из m резервных цепей схемы будет равна

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t), \quad (2.16)$$

где $p_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента в j -й цепи.

Вероятность отказа этой цепи

$$Q_j(t) = 1 - P_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n p_i(t). \quad (2.17)$$

Вероятность отказа всей системы (основной и m параллельных цепей)

$$Q_C(t) = \prod_{j=1}^{m+1} Q_j(t) = \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]. \quad (2.18)$$

Наконец, вероятность безотказной работы системы

$$P_C(t) = 1 - Q_C(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} \left[1 - \prod_{i=1}^n p_i(t) \right]. \quad (2.19)$$

Полагая, что резервированная система составлена из одинаковых элементов $p_i(t) = p_j(t) = p$, $q_i(t) = q_j(t) = q$, перепишем выражение для определения вероятности безотказной работы:

$$P_{общ} = 1 - (1 - p^n)^{m+1}, \quad (2.20)$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{общ} = (1 - p^n)^{m+1} = [1 - (1 - q)^n]^{m+1}. \quad (2.21)$$

2.5. Надежность систем при постоянном раздельном резервировании

При раздельном (поэлементном) резервировании резервируются отдельные части (элементы) системы (рис. 2.4).

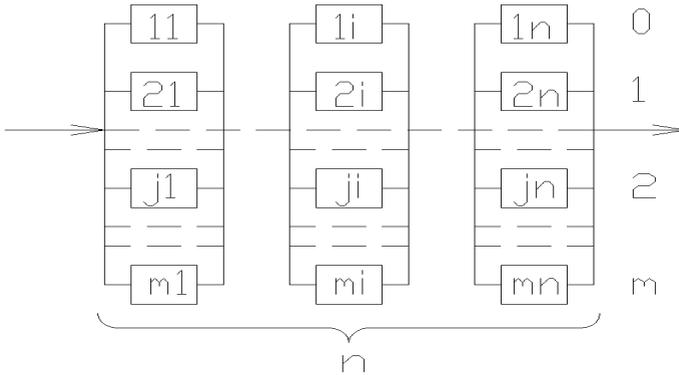


Рис. 2.4. Схема замещения при постоянном раздельном резервировании

Для этой схемы вероятность безотказной работы определится из выражения

$$P_C(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - p_j(t)] \right\}, \quad (2.22)$$

где $p_j(t)$ – вероятность безотказной работы j -го элемента в i -й группе.

Если резервированная система составлена из одинаковых элементов, вероятность безотказной работы равна

$$P_{разд} = [1 - (1 - p)^{m+1}]^n, \quad (2.23)$$

тогда вероятность отказа

$$Q_{разд} = 1 - [1 - (1 - p)^{m+1}]^n = 1 - (1 - q^{m+1})^n. \quad (2.24)$$

2.6. Определение минимального числа резервных элементов

Иногда необходимо определить минимальное число резервных элементов для обеспечения заданного уровня надежности технической системы.

При общем резервировании на основании формулы (2.20) можно записать неравенство

$$1 - P_{\text{общ}} \leq (1 - p_i^n)^{m+1}.$$

Логарифмируя его, получаем

$$\lg(1 - P_{\text{общ}}) \leq (m + 1)\lg(1 - p_i^n).$$

Число резервных цепей

$$m \geq \frac{\lg(1 - P_{\text{общ}})}{\lg(1 - p_i^n)} - 1. \quad (2.25)$$

При раздельном резервировании на основании формулы (2.23) можно записать соотношение

$$1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд}}} \geq (1 - p_i)^{m+1}.$$

После логарифмирования получаем

$$\lg(1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд}}}) \geq (m + 1)\lg(1 - p_i).$$

Число резервных элементов

$$m \leq \frac{\lg(1 - \sqrt[n]{P_{\text{разд}}})}{\lg(1 - p_i)} - 1. \quad (2.26)$$

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. Потоки отказов и восстановлений

Последовательность событий, происходящих одно за другим в случайные моменты времени, называют потоком событий. Основными потоками для восстанавливаемых систем являются потоки отказов и восстановлений. Наибольшее применение в практике получил простейший поток, обладающий тремя свойствами: ординарность, стационарность и отсутствие последействия [7]. Зная их, можно упростить описание конкретного случайного процесса.

Поток называется *ординарным*, если вероятность появления на одном промежутке времени Δt двух и более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления только одного события. Ординарность потока выражает собой условие практической невозможности одновременного появления двух и более событий. Поток отказов одного восстанавливаемого устройства всегда является ординарным, так как второй отказ может иметь место только после восстановления этого устройства.

Поток отказов (восстановлений) называется *стационарным*, если вероятность появления определенного числа событий за фиксированный промежуток времени зависит только от длины промежутка и не зависит от положения промежутка на оси времени, т. е. плотность потока появления событий постоянна во времени. Следовательно, для стационарного потока отказов интенсивность и параметр потока также не зависят от времени:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const} \text{ и } \omega(t) = \omega = \text{const}.$$

Если поток отказов стационарный и ординарный, то

$$\lambda = \omega = \text{const}. \tag{3.1}$$

Отсутствие последействия характеризуется тем, что вероятность появления событий на любом промежутке времени не зависит от того, появлялись или не появлялись события в моменты времени, предшествующие началу рассматриваемого промежутка. Таким образом, предыстория потока не сказывается на вероятности появления событий в ближайшем будущем. Условие отсутствия последействия означает

взаимную независимость отказов, т. е. отказы являются событиями случайными и независимыми.

Потоки событий, одновременно обладающие свойствами ординарности (события не наступают одновременно) и отсутствия последствия (события независимы), называются пуассоновскими, их название связано с законом Пуассона. Эти потоки могут быть как стационарными, так и нестационарными. Стационарный пуассоновский поток событий называется простейшим, и вероятность появления k событий простейшего потока за время длительностью t определяется формулой Пуассона

$$P_K(t) = \frac{(\lambda t)^K}{k!} e^{-\lambda t}. \quad (3.2)$$

Теоретические расчеты будем производить в предположении того, что потоки простейшие. В периоды приработки и старения объектов потоки отказов являются нестационарными, поэтому на практике эти периоды стремятся по возможности сократить предварительными испытаниями ряда элементов до начала эксплуатации и своевременной заменой устаревшего оборудования. Далее будет рассматриваться электрическая система в период нормальной эксплуатации, так как этот период представляет наибольший интерес для практики [12], [15], [16], [17].

3.2. Марковские случайные процессы

Для расчета количественных показателей надежности восстанавливаемых объектов применяют различные методы. Некоторые из них уже устоялись, другие продолжают развиваться, третьи только зарождаются. Из наиболее употребляемых в настоящее время методов можно назвать следующие: методы, основанные на использовании классической теории вероятностей (например, логико-вероятностный метод); методы, основанные на использовании теории массового обслуживания (в частности, метод пространства состояний); методы, основанные на использовании теории графов.

Следует отметить, что деление методов расчета достаточно условно, так как в пределах каждого метода могут использоваться разделы из других методик.

Для того чтобы рассчитать надежность системы методом пространства состояний, сначала рассматривают состояние системы, которое определяется состоянием каждого элемента: элемент работает, отказал

или находится еще в каком-либо состоянии. Состояния такой системы под воздействием потоков отказов и восстановлений могут меняться во времени. В общем случае можно говорить о некоторой системе, которая в процессе функционирования может менять свои состояния. Все возможные состояния системы образуют пространство состояний [21].

При использовании метода пространства состояний для описания процесса переходов системы из одного состояния в другое применяют модели Маркова. Строго обосновать применение этого метода можно при следующих предположениях: 1) каждый из элементов системы имеет экспоненциальное распределение времени безотказной работы; 2) вероятность перехода из одного состояния в другое не должна зависеть от предыстории системы, т. е. от состояний, в которых система находилась ранее. На практике эти условия могут не выполняться, но все равно применяются указанные предположения.

Если состояния системы меняются во времени случайным образом, то это можно рассматривать как случайный процесс. Если число состояний системы конечно или счетно, а переход из состояния в состояние происходит мгновенно (скачком), то система называется системой с дискретными состояниями. Если переходы системы из состояния в состояние могут происходить только в заранее фиксированные моменты времени, то смена состояний в системе называется случайным процессом с дискретным временем. Если переход системы из состояния в состояние может происходить в любой заранее неизвестный случайный момент времени, то процесс называют случайным с непрерывным временем.

Случайный процесс называется марковским, если для любого момента времени t_i вероятность любого состояния системы в будущем (при $t > t_i$) зависит только от её состояния S_i в момент t_i и не зависит от того, когда и как система пришла в состояние S_i (не зависит от предыстории системы). Марковский процесс с дискретными состояниями и дискретным временем называют цепью Маркова.

В теории надежности широкое применение находят марковские процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем [7]. Для непрерывного марковского процесса сумма вероятностей состояний для любого промежутка времени равна единице:

$$\sum_i p_i(t) = 1. \quad (3.3)$$

При изучении случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем в теории надежности считают, что переходы системы из одного состояния в другое происходят под воздействием потоков отказов и восстановлений, а переходы из состояния S_i в состояние S_j описывают при помощи их интенсивностей $\lambda_{ij}(t)$. Интенсивность перехода определяется как

$$\lambda_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (3.4)$$

Из формулы (3.4) следует, что при малом Δt вероятность перехода $p_{ij}(\Delta t)$ может быть определена по выражению

$$p_{ij}(\Delta t) \approx \lambda_{ij}(t) \Delta t. \quad (3.5)$$

Если интенсивности переходов $\lambda_{ij}(t)$ не зависят от времени ($\lambda_{ij} = \text{const}$), то непрерывный марковский процесс называется однородным, т. е. интенсивности переходов постоянны в однородном марковском процессе. Если λ_{ij} являются функциями времени, то непрерывный марковский процесс называется неоднородным.

Процесс изменения состояний можно проиллюстрировать с помощью графа состояний системы (рис. 3.1). Граф задается множеством точек или вершин и множеством линий или ребер, соединяющих между собой все или часть точек. Если ребра ориентированы, что обычно показывается стрелкой, то они называются дугами и граф с такими ребрами называется ориентированным графом, если ребра не имеют ориентации, то граф называется неориентированным [7]. Вершины графа обозначаются номерами состояний (в простейшем случае таких состояний будет два: 0 – система работоспособна, 1 – система в состоянии отказа), дуги графа показывают направления переходов системы из одного состояния в другое.

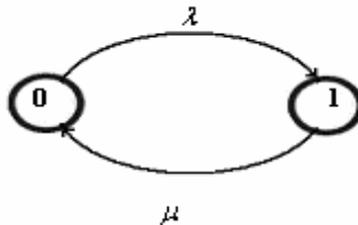


Рис. 3.1. Граф состояний системы

Если процесс является марковским, то его можно описать с помощью дифференциальных уравнений, в которых неизвестными являются вероятности состояний $p_0(t)$ и $p_1(t)$. При решении используются следующие условия: поток отказов простейший с интенсивностью отказов $\lambda = \text{const}$ и восстановлений $\mu = \text{const}$, закон распределения времени восстановления и времени между отказами экспоненциальный. Для любого момента времени $p_0(t) + p_1(t) = 1$. Если поведение системы рассматривать в интервале времени $[0, t + \Delta t]$, то система в момент $t + \Delta t$ будет находиться в состоянии 0 и за время Δt отказов не наблюдалось, а если система в момент времени t находилась в состоянии 1, то за время Δt восстановление закончилось. Тогда по формуле полной вероятности

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)e^{-\lambda\Delta t} + p_1(t)(1 - e^{-\mu\Delta t}).$$

Так как $e^{-\lambda\Delta t} \approx 1 - \lambda\Delta t$, $e^{-\mu\Delta t} \approx 1 - \mu\Delta t$, то

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + p_1(t)(1 - \mu\Delta t).$$

Проводя аналогичные рассуждения для второго состояния, получаем второе уравнение

$$p_1(t + \Delta t) = p_1(t)(1 - \mu\Delta t) + p_0(t)\lambda\Delta t.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ можно получить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = -\mu p_1(t) + \lambda p_0(t). \end{cases} \quad (3.6)$$

Уравнения вида (3.6) получили название дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена.

К этим уравнениям добавляется уравнение для вероятностей состояний:

$$p_0(t) + p_1(t) = 1. \quad (3.7)$$

Кроме того, должны быть заданы начальные условия. Тогда, решая любое дифференциальное уравнение из двух (3.6) совместно с уравнением (3.7) при заданных начальных условиях, можно определить вероятности состояний системы.

Если граф ориентированный, то систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний можно непосредственно записать, пользуясь следующим правилом. В левой части уравнения записы-

вается производная от вероятности рассматриваемого состояния во времени, в правой части – столько слагаемых, сколько дуг (входящих и выходящих) связано с данным состоянием. Каждое слагаемое равно произведению интенсивности перехода, являющейся обозначением рассматриваемой дуги, на вероятность того состояния, из которого выходит эта дуга. Причем если дуга для данного состояния (для которого составляется уравнение) является выходящей, то соответствующее ей слагаемое имеет знак минус, если дуга является входящей, то соответствующее ей слагаемое имеет знак плюс.

Во многих случаях интерес представляют только стационарные значения вероятностей ($t \rightarrow \infty$). Тогда от системы дифференциальных уравнений переходят к системе алгебраических уравнений. Для этого необходимо все производные приравнять к нулю ($\frac{dp_i(t)}{dt} = 0$) и произвести замену $p_i(t)$ на p_i . Тогда, например, система уравнений (3.6) примет вид:

$$0 = -\lambda p_0 + \mu p_1; \quad 0 = \lambda p_0 - \mu p_1.$$

Заменяя одно из этих уравнений выражением $p_0 + p_1 = 1$, получаем систему из двух независимых уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda p_0 + \mu p_1, \\ p_0 + p_1 = 1. \end{cases} \quad (3.8)$$

В результате расчетов получается

$$p_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + \bar{T}_B} = K_I; \quad (3.9)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\bar{T}_B}{\bar{T} + \bar{T}_B} = K_{II}. \quad (3.10)$$

При условии, когда $\bar{T} \geq \bar{T}_B$, коэффициент вынужденного простоя определяется следующим образом:

$$K_{II} = \frac{\bar{T}_B}{\bar{T} + \bar{T}_B} \cong \frac{\bar{T}_B}{\bar{T}} = \lambda \cdot \bar{T}_B. \quad (3.11)$$

3.3. Расчет показателей надежности восстанавливаемых элементов

Как уже говорилось ранее, одним из наиболее распространенных и эффективных методов расчета является метод, основанный на мар-

ковских моделях [21]. Составляя графы переходов системы с последовательным и параллельным соединением и решая уравнения, можно получить формулы расчета показателей надежности при последовательном и параллельном соединении [2], [10], [11], [15], [19], [21].

Последовательное соединение восстанавливаемых элементов. Для высоконадежных элементов электрических систем приближенно (с погрешностью менее 5%) среднюю вероятность отказов или коэффициент вынужденного простоя системы можно определить как [19], [20], [21]:

$$K_{П,C} = q_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \bar{T}_{Bi}. \quad (3.12)$$

При оценке надежности систем электроснабжения в практических расчетах считают $\lambda = \omega = \text{const}$.

Параметр потока отказов системы: $\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i$.

Среднее время безотказной работы системы: $\bar{T}_C = \frac{1}{\lambda_C}$.

Среднее время восстановления системы:

$$\bar{T}_{BC} = \frac{q_C}{\lambda_C} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \bar{T}_{Bi}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (3.13)$$

Параллельное соединение восстанавливаемых элементов. Средняя вероятность отказов или коэффициент вынужденного простоя системы [2], [19], [20], [21]:

$$K_{П,C} = q_C = \prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot \bar{T}_B. \quad (3.14)$$

Параметр потока отказов системы [15], [19]:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \lambda_j \bar{T}_B. \quad (3.15)$$

Среднее время безотказной работы системы: $\bar{T}_C = \frac{1}{\lambda_C}$.

Среднее время восстановления системы:

$$\bar{T}_{BC} = \frac{q_C}{\lambda_C} = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i \cdot \bar{T}_{Bi}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n-1} \lambda_j \cdot \bar{T}_{Bj}}. \quad (3.16)$$

3.4. Методы определения надежности

Методы определения надежности можно подразделить на методы прогнозирования, экспериментальные и расчетные.

Под *прогнозированием надежности* понимается предсказание значений показателей надежности в условиях неполноты информации о составе объекта, характеристиках его составляющих, предполагающихся условиях его функционирования и т. п.

Под *экспериментальным методом* понимается метод опытного определения надежности реальных объектов, когда объект и условия, в которых он функционирует, известны исследователям с достаточной полнотой и при необходимости могут целенаправленно изменяться.

Под *расчетом надежности* понимается метод получения численных показателей надежности объекта по известным характеристикам надежности его элементов, по известному их структурному и функциональному воздействию. Данные показатели рассмотрены выше.

Все три группы методов имеют принципиально различную основу, но все они применяются в совокупности, дополняя друг друга. Например, пусть поставлена задача определить надежность энергосистемы, которая будет формироваться из существующей путем добавления каких-то элементов (новых электростанций, линий электропередачи, подстанций и т. п.). С одной стороны, можно было бы применить экспериментальный метод. Но, во-первых, энергосистема постоянно изменяется (наращивается, развивается), а во-вторых, надежность энергосистемы обычно весьма высокая. Поэтому для получения необходимой информации потребуются очень большой период. В этом случае в прямом виде экспериментальный метод неприменим.

Но если энергосистему представить как систему, состоящую из групп однотипных элементов (линий электропередач, трансформаторов, коммутационной аппаратуры, генераторов и т. п.), то, поскольку таких элементов много, надежность их ниже, чем надежность энергосистемы в целом, здесь уже применим экспериментальный метод по отношению к элементам системы.

Таким образом, применяя экспериментальный метод к элементам энергосистемы, можно определить их фактическую надежность. Если же в перспективе эти элементы будут изменяться (совершенствоваться, модернизироваться), будут меняться условия их работы или появляться

новые, то здесь могут быть успешно применены методы прогнозирования. В итоге появится информация об элементах будущей системы, их связях, структуре системы. В этих условиях наиболее эффективен для использования расчетный метод.

Следовательно, поставленная задача, по существу, может быть решена только на основе совместного использования всех трех групп методов определения надежности.

3.5. Экспериментальные методы определения надежности

Показатели надежности могут быть получены этими методами либо по результатам испытаний, либо наблюдением за функционированием объекта в условиях эксплуатации, т. е. методы подразделяются на методы испытаний на надежность и на методы наблюдений [10], [12].

3.5.1. Методы испытаний

Эти методы организуются специально с целью определения показателей надежности, объем их обычно заранее планируется, условия функционирования объектов устанавливаются исходя из требований оценки конкретных показателей. Такие испытания, как правило, применяются для изделий, выпускаемых в достаточно большом количестве. Производить специальные испытания для сложных объектов, систем во многих случаях не представляется возможным, так как объем выпуска обычно ограничен единицами экземпляров, а процесс изготовления, отладки, проверки функционирования и доводки занимает слишком много времени и дорого стоит. Показатели надежности таких объектов оцениваются в основном по результатам наблюдений на этапе эксплуатации.

Экспериментальные методы требуют значительных затрат времени. Сокращение времени может быть достигнуто применением либо специальных методов планирования и обработки, либо форсированных режимов испытаний.

3.5.2. Методы наблюдения

Иногда эти методы еще называют ретроспективными. Они представляют собой извлечение и обработку информации из анализа работы действующих объектов. Стоимость работ, связанных с оценкой на-

дежности эксплуатируемого оборудования этими методами, в отличие от стоимости испытаний на надежность минимальна. В основном это затраты на сбор и обработку статистических данных.

Длительность наблюдения и массив статистических данных определяются продолжительностью всего процесса эксплуатации и общим количеством действующих объектов. Основные трудности этого метода получения показателей надежности состоят в том, что процесс функционирования объектов не зависит от наблюдателя, который должен суметь извлечь объективную информацию о надежности объектов по записям, выполненным большим числом разных наблюдателей.

В общем случае при эксплуатации объектов могут изменяться условия работы, режимы загрузки и т. п. Поэтому возникает задача не просто оценить фиксированные значения показателей надежности, а установить зависимость этих показателей от условий и параметров работы объекта.

4. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Системный анализ как дисциплина сформировался в результате возникновения необходимости исследовать и проектировать сложные системы, управлять ими в условиях неполноты информации, ограниченности ресурсов и дефицита времени. Системный анализ является дальнейшим развитием целого ряда дисциплин, таких как исследование операций, кибернетика, теория принятия решений, экспертный анализ, теория организации эксплуатации систем и т. д. Перечисленные дисциплины являются основой системного анализа. Таким образом, системный анализ – междисциплинарный курс, обобщающий методологию исследования сложных технических, природных и социальных систем [3], [4], [5], [9], [14]. Или системный анализ можно определить как дисциплину, занимающуюся проблемами принятия решений в условиях, когда альтернатива требует анализа сложной информации различной физической природы.

4.1. Основные понятия и определения

Первоначально системная наука развивалась в рамках прикладных научных дисциплин, относящихся к различным сторонам жизнедеятельности человека. В каждой из дисциплин существовало свое определение системы, во многих случаях – не одно. В настоящее время в современной научной литературе существует весьма большое количество близких по смыслу определений понятия «система». Под исследуемой здесь системой будем понимать такую совокупность элементов, объединенных общими ресурсами, связями, функциональной средой и целью существования, которая обладает свойствами, отсутствующими у отдельных элементов [3], [4], [5], [9], [14]. Системы, обладающие многоуровневостью (иерархичностью), называются сложными системами. Элементами же будем считать любые, условно неделимые и самостоятельно функционирующие части системы. Они, не являясь структурами одного типа, при непосредственном взаимодействии между собой порождают систему. Рассмотрим примеры элементов. В системе управления и защиты энергоблоков атомных станций при одном уровне иерархии рассмотрения системы в качестве элементов можно

выделить блок питания, датчики, устройства, вырабатывающие сигналы срабатывания аварийной защиты, устройства автоматического регулирования и прочие блоки и устройства [3], [12]. В свою очередь, каждый блок и каждое устройство могут быть расчленены на более мелкие составляющие, в их структуре можно выделить резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы. Подсистема – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, реализующих определенную группу функций, подцелей, направленных на достижение общей цели системы. Отличие подсистемы от простой группы элементов состоит в том, что для подсистемы формулируются подцели ее функционирования [3], [4], [5]. Например, в системе управления и защиты энергоблоков атомных станций выделяют ряд подсистем: автоматического регулирования, ручного регулирования, аварийной защиты, аварийной и предупредительной сигнализации и т. д. Каждая из указанных подсистем выполняет конкретную функцию. Например, подсистема аварийной защиты принудительно прекращает работу реакторной установки в случае возникновения аварийной ситуации.

Структура отражает определенные взаимосвязи, взаиморасположение составных частей системы, ее устройство, строение. Таким образом, структура системы – состав системы и схема связей между ее элементами [3], [4], [5], [9], [14]. Принятый способ описания структур – графическое изображение. Основные типы структур – это сетевые и иерархические.

Сетевые структуры представляют собой отображение взаимосвязи объектов между собой. С помощью сетевых структур отображаются пространственные взаимосвязи между элементами, как правило, одного иерархического уровня. Различают следующие виды сетевых структур: линейные, древовидные и кольцевые. Линейные структуры – это структуры со строго упорядоченным взаимоотношением элементов «один к одному». Древовидная структура представляет собой объединение многих линейных подструктур. Кольцевая структура (циклическая) имеет замкнутые контуры в соответствующих графах. С помощью циклических структур изображаются схемы циркуляции информации в системах.

Иерархические структуры применяются для описания подчиненности элементов в структурах управления. Термин «иерархия» означает соподчиненность, порядок подчинения низших по должности лиц высшим.

Следующее понятие – это связь. Связь определяют как ограничение степени свободы элементов. Связь характеризуется направлением, силой и характером. По первому признаку связи делят на направленные и ненаправленные. По второму признаку различают сильные и слабые связи. По характеру выделяют связи подчинения, равноправные, связи управления. Различают также связи по направленности процессов – прямые и обратные. Обратные связи могут быть положительными, сохраняющими тенденции происходящих в системе изменений того или иного параметра, и отрицательными – противодействующими тенденциям изменения выходного параметра. Обратная связь является основой приспособления систем к изменяющимся условиям существования, основой саморегулирования и развития систем.

Цель системы – желательные состояния или результаты ее поведения. В практических применениях цель – это идеальное устремление, которое позволяет коллективу увидеть перспективы или реальные возможности, обеспечивающие своевременное завершение очередного этапа на пути к идеальным устремлениям [3]. Цель достигается путем решения задач, которые желательно достичь к определенному моменту времени в пределах определенного периода функционирования системы.

Из вышесказанного следует, что система имеет следующие основные характеристики (рис. 4.1):

1. Компоненты.
2. Связи, посредством которых осуществляется взаимодействие между компонентами.
3. Граница.
4. Цель.
5. Внешняя среда.
6. Вход, выход.
7. Законы, правила, ограничения функционирования.

Системные характеристики можно описать следующим образом.

1. Компонент есть либо неделимая часть, либо агрегат, состоящий из частей и называемый подсистемой.
2. Компоненты взаимодействуют между собой таким образом, что функционирование одного влияет на функционирование другого.
3. Система имеет границу, внутри которой содержатся все компоненты и которая устанавливает пределы системы, отделяя ее от других систем.

4. Все компоненты работают вместе, чтобы достичь цели существования системы.
5. Система существует и функционирует внутри окружающей (внешней) среды. Окружающая среда влияет на систему и подвергается влиянию системы.
6. Система имеет множество входных и выходных объектов. Входы – множество воздействий на объект со стороны внешней среды. Выходы – множество возможных откликов моделируемого объекта.
7. Система имеет законы, правила, ограничения функционирования.

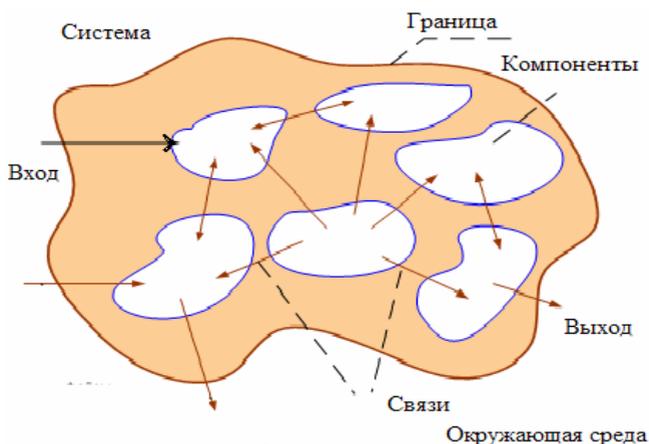


Рис. 4.1. Характеристики системы

4.2. Классификация систем

В настоящее время отсутствует не только общепринятое разбиение систем по группам, но и обязательно необходимых для этого признаков классификации. Таким образом, подходы к классификации системы могут быть самыми разными (рис. 4.2) [3], [14]:

- по природе (доступность и происхождение) – физические (естественные и материальные) и абстрактные (искусственные, идеальные);
- по виду отображаемого объекта – технические, биологические, социальные и т. п.;
- по характеру поведения – детерминированные, вероятностные, игровые, статические и динамические;

- по типу целеустремленности – открытые и закрытые;
- по сложности структуры и поведения – простые и сложные;
- по виду научного направления, используемого для их моделирования, – математические, физические, химические и др.;
- по степени организованности – хорошо организованные, плохо организованные и самоорганизующиеся.



Рис. 4.2. Классификация систем

Рассмотрим некоторые из представленных видов классификации. Детерминированной называется система, состояние которой в будущем однозначно определяется ее состоянием в настоящий момент времени и законами, описывающими переходы элементов и системы из одних состояний в другие. Составные части в детерминированной системе взаимодействуют точно известным образом. Примером детерминированной системы может служить калькулятор, если считать его абсолютно надежным. Установка соответствующих чисел и задание порядка вычисления однозначно определяют результат работы устройства.

Вероятностные или стохастические системы – это системы, поведение которых описывается законами теории вероятностей. Для

вероятностной системы знание текущего состояния и особенностей взаимной связи элементов недостаточно для предсказания будущего поведения системы со всей определенностью. Для такой системы имеется ряд направлений возможных переходов из одних состояний в другие, т. е. имеется группа сценариев преобразования состояний системы, и каждому сценарию поставлена в соответствие своя вероятность. Примером стохастической системы может служить мастерская по ремонту электронной и радиотехники. Срок выполнения заказа по ремонту конкретного изделия зависит от количества аппаратуры, поступившей в ремонт до поступления рассматриваемого изделия, от характера повреждений каждого из находящихся в очереди объектов, от количества и квалификации обслуживающего персонала и т. п.

Игровой является система, осуществляющая разумный выбор своего поведения в будущем. В основе выбора лежат оценки ситуаций и предполагаемых способов действий, выбираемых на основе заранее сформированных критериев, а также с учетом соображений неформального характера. Руководствоваться этими соображениями может только человек. Примером игровой системы может служить организация, выполняющая некоторые работы и выступающая в качестве исполнителя. Исполнитель вступает в отношения с заказчиком. Интересы исполнителя и заказчика противоположны. Исполнитель старается продать свою работу как можно выгоднее. Заказчик, наоборот, пытается сбить цену и соблюсти свои интересы. В данном торге между ними проявляется игровая ситуация.

Классификация по данному признаку условна, как и многое другое, касающееся характеристики сложных систем. Она допускает разные толкования принадлежности той или иной системы к сформированным классам. Так, в детерминированной системе можно найти элементы стохастичности. С другой стороны, детерминированную систему можно считать частным случаем стохастической системы, если положить вероятности переходов из состояния в состояние соответственно равными нулю (перехода нет) и единице (переход имеет место). Точно так же стохастическую систему можно рассматривать как частный случай игровой, когда идет игра с природой.

Следующий признак классификации – открытые и закрытые системы. По данному признаку классификации системы характеризуются

различной степенью взаимодействия с внешней средой. Открытые системы обладают особенностью обмениваться с внешней средой массой, энергией, информацией. Замкнутые (или закрытые) системы изолированы от внешней среды. Предполагается, что разница между открытыми и замкнутыми системами определяется с точностью до принятой чувствительности модели.

По степени сложности системы подразделяются на простые, сложные и очень сложные. Простые системы характеризуются небольшим количеством возможных состояний, их поведение легко описывается в рамках той или иной математической модели. Сложные системы отличаются разнообразием внутренних связей, но допускают их описание. Причем набор методов, привлекаемых для описания сложных систем, как правило, многообразен, т. е. для построения математической модели сложной системы применяются различные подходы и разные разделы математики. Очень сложные системы (большие) характеризуются большой разветвленностью связей и своеобразностью отношений между элементами. Многообразие связей и отношений таково, что нет возможности все их выявить и проанализировать без предварительной декомпозиции (разложение целого на части) с последующим агрегированием (объединение частей в целое). Простыми системами можно считать лентопротяжные механизмы, механические передачи и т. д. Сложными системами являются электронно-вычислительная машина, система управления и защиты энергоблока, система электроснабжения промышленного объекта и пр. Очень сложными являются социотехнические системы, такие как автоматизированные системы управления крупным предприятием, экспертные системы с функциями поддержки и принятия управленческих решений.

По виду отображаемого объекта системы бывают технические, биологические, социальные и т. п. Технической называется система, в которой поставленные цели могут быть полностью достигнуты в результате протекания внутренних явлений: физических, тепловых и т. д. В технических системах роль человека минимальна, как правило, работа системы достаточно детально описывается инструкциями и другими регламентирующими документами.

В социотехнических, организационных системах предполагается, что цели достигаются в результате совместной работы механизмов, аг-

регатов, станков и людей (производственного персонала), осуществляющих производственную деятельность и определяющих направления функционирования технических систем. Участие человека — основная черта организационных систем.

Социальные системы представляют собой коллектив людей, участвующий в некотором едином процессе. Особенностью социальных систем является то, что отдельные личности помимо общей цели для всей системы могут иметь еще свои подцели, которые не всегда совпадают с целями системы, а зачастую могут даже входить с ними в противоречие.

Классификация по признаку организованности систем впервые была предложена В.В. Налимовым [3]. Под хорошо организованной понимается система, у которой определены все элементы, их взаимосвязь, правила объединения в более крупные компоненты, связи между всеми компонентами и целями системы, ради достижения которых создается или функционирует система. При этом подразумевается, что все элементы системы с их взаимосвязями между собой, а также с целями системы можно отобразить в виде аналитических зависимостей. При формулировании задачи принятия решения для хорошо организованной системы проблемная ситуация описывается в виде математического выражения, критерия эффективности, критерия функционирования системы, который может быть представлен сложным уравнением, системой уравнений, сложными математическими моделями, включающими в себя и уравнения, и неравенства, и т. п. Важно, что решение задачи при представлении ее в виде хорошо организованной системы осуществляется аналитическими методами с использованием моделей формализованного представления системы. Примером хорошо организованной системы может служить сложное электронное устройство. Описание его работы производят с помощью системы уравнений, учитывающих условия функционирования, в том числе наличие шумов, нестабильность электропитания и т. д.

При представлении объекта в виде плохо организованной системы не ставится задача определить все учитываемые компоненты, их свойства и связи между собой, а также с целями системы. Для плохо организованной системы формируется набор макропараметров и функциональных закономерностей, которые будут ее характеризовать.

Определение этих параметров и восстановление функциональных зависимостей осуществляется на основании некоторой выборочной информации, характеризующей исследуемый объект или процесс. Далее полученные оценки характеристик распространяют на поведение системы в целом. При этом предполагается, что полученный результат обладает ограниченной достоверностью и его можно использовать с некоторыми оговорками. Например, если результат получен на основании статистических наблюдений за функционированием системы на ограниченном интервале времени, т. е. на основании выборочных наблюдений, то его можно использовать с некоторой доверительной вероятностью. Примером применения подхода к отображению объектов в виде плохо организованной системы можно считать оценивание характеристик надежности системы с множеством компонентов. В данном случае характеристики надежности группы однотипных элементов определяются на основании выборочной информации, полученной в результате наблюдений за их работой на ограниченном отрезке времени при определенных уровнях воздействующих факторов. Затем полученные оценки распространяются на весь период эксплуатации объекта. Данные оценки используются при проведении расчетов характеристик надежности всей системы. Самоорганизующиеся системы – это системы, обладающие свойством адаптации к изменению условий внешней среды, способные изменять структуру при взаимодействии со средой, сохраняя при этом свойства целостности; системы, способные формировать возможные варианты поведения и выбирать из них наилучшие. Эти особенности обусловлены наличием в структуре системы активных элементов, которые, с одной стороны, обеспечивают возможность адаптации, приспособления системы к новым условиям существования, а с другой – вносят элемент неопределенности в поведение системы, чем затрудняют проведение анализа системы, построение ее модели, формальное ее описание и в конечном счете затрудняют управление такими системами. Примерами самоорганизующихся систем могут служить биологические системы, предприятия и их система управления, городские структуры управления и т. д.

5. ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Укрупненный системный анализ состоит из этапов постановки задачи, структуризации системы, построения и исследования модели. Так как не все перечисленные этапы имеют формальный аппарат, то на современном уровне системный анализ не является строгим научным методом, некоторые этапы и задачи выполняются на содержательном уровне, на основе логики, здравого смысла, инженерного опыта и интуиции.

Перечислим основные процедуры системного анализа [3], [4], [5], [9], [14]:

- 1) постановка задачи системного анализа;
- 2) изучение структуры системы, анализ ее компонентов, выявление взаимосвязей между отдельными элементами;
- 3) сбор данных о функционировании системы, исследование информационных потоков, наблюдения и эксперименты над анализируемой системой;
- 4) построение моделей;
- 5) проверка адекватности моделей, анализ неопределенности и чувствительности;
- 6) исследование ресурсных возможностей;
- 7) определение целей системного анализа;
- 8) формирование критериев;
- 9) генерирование альтернатив;
- 10) реализация выбора и принятие решений;
- 11) внедрение результатов анализа.

5.1. Постановка задач системного анализа

Особенностью постановки задач системного анализа является то обстоятельство, что наряду со строгим математическим аппаратом применяются эвристические методы, основанные на интуиции исследователя, его опыте в решении задач подобного типа. Рассмотрим некоторые постановки задач, являющиеся типовыми задачами системного анализа.

Основные типовые задачи:

- 1) задачи распределения ресурсов;
- 2) задачи управления запасами;

- 3) задачи организации обслуживания оборудования;
- 4) задачи массового обслуживания;
- 5) задачи анализа риска и безопасности использования новых технологий.

Задачи распределения ресурсов возникают, когда существует определенный набор работ или операций, которые необходимо выполнить, а имеющихся в наличии ресурсов для выполнения каждой из них наилучшим образом не хватает. Для того чтобы решить задачу распределения ресурсов, необходимо сформулировать некоторую систему предпочтений.

Одна из задач управления запасами заключается в минимизации суммы ожидаемых затрат, связанных с хранением запасов, и потерь, обусловленных их отсутствием в случае необходимости. Задача управления запасами есть комплексная задача, составными частями которой являются ведение информационной базы, построение моделей управления запасами, оптимизация объема создаваемого запаса и времени его пополнения и т. д.

К задачам организации обслуживания оборудования относятся задачи назначения времени проведения проверок исправности функционирования оборудования, проведения профилактического обслуживания, выбор оптимального числа запасных изделий и приборов для оборудования, находящегося в эксплуатации. Любое оборудование в процессе работы изнашивается, устаревает и поэтому нуждается в организации контроля за исправностью его функционирования, а также в проведении ремонтных, восстановительных работ. Под техническим обслуживанием систем понимается совокупность мероприятий, которые служат поддержанию и восстановлению рабочих свойств систем. Данные мероприятия подразделяют следующим образом:

- текущее обслуживание;
- контроль работоспособности и диагностика отказов;
- ремонтно-восстановительные работы.

Предупредительные работы проводятся в системах, которые еще не утратили работоспособность, т. е. еще функционируют. Действия, необходимые для восстановления работоспособности после того, как система отказала, относятся к ремонтно-восстановительным работам. Обычно в теории систем предупредительные работы называют профи-

лактическими, а восстановительные — аварийным восстановлением. В свою очередь, мероприятия по ремонту, если система после его окончания по своим качествам эквивалентна новой, называют полным восстановлением.

Характер функционирования и обслуживания систем существенно зависит от процессов, происходящих внутри системы и обуславливающих тип отказов. Различают внезапные и постепенные отказы. Внезапный отказ практически мгновенно переводит систему из работоспособного состояния в состояние отказа. О постепенных отказах говорят в тех случаях, когда удовлетворительное функционирование системы сохраняется в некоторой допустимой области определяющих параметров, которые, в свою очередь, зависят от времени. Наблюдения за вектором параметров позволяют спрогнозировать состояния работоспособности и неработоспособности системы.

На практике при организации функционирования систем об их состоянии можно узнать только с помощью контроля. Контрольные проверки являются неотъемлемой частью мероприятий по восстановлению работоспособности. Поскольку, с одной стороны, отказ системы приводит или может привести к экономическим потерям, а с другой стороны, контроль также сопряжен с затратами, возникает задача оптимального с точки зрения общих затрат планирования проверок. Постановка задачи в этом случае заключается в том, чтобы определить сроки проведения контрольных проверок по обнаружению неисправностей, при которых суммарные затраты на проведение контроля и потери от простоя оборудования из-за несвоевременного обнаружения и замены вышедших из строя элементов минимизируются.

Ремонтно-восстановительные мероприятия — более масштабные по своему содержанию работы. Они связаны с проведением комплексной проверки работоспособности систем, заменой отказавших или достигших установленного ресурса элементов, регулировкой отдельных параметров и прочими работами. При планировании профилактических и восстановительных мероприятий так же, как и в задаче планирования контрольных проверок, необходимо учитывать, что несвоевременное проведение профилактических работ может привести к отказам системы и связанным с ними материальным потерям. С другой стороны, проведение профилактических работ также сопряжено

с определенными материальными издержками, поэтому их необоснованно частое проведение снижает эффективность функционирования системы. Таким образом, в данном случае также имеет место оптимизационная задача. Ее формулировка может выглядеть следующим образом: определить сроки проведения профилактических работ и замены оборудования, при которых суммарные ожидаемые затраты по ремонту и замене, а также потери, связанные с ухудшением технологических характеристик работы оборудования ввиду его старения, минимизируются на всем интервале эксплуатации системы.

И наконец, существует еще одна задача, относящаяся к задачам организации обслуживания систем, — обеспечение запасными частями или элементами. Она формулируется следующим образом: какое количество запасных элементов следует иметь для того, чтобы быть уверенным в том, что система с вероятностью λ будет бесперебойно функционировать в течение времени t .

Все сформулированные задачи относятся к числу оптимизационных. Для задач организации обслуживания необходимо применять вероятностные модели, поскольку в качестве управляющего параметра в данных задачах используется наработка объектов до отказа, а это, как известно, величина случайная. Поэтому при построении моделей такого типа необходимо проводить большую работу по сбору информации о функционировании системы и ее элементов, о наработках элементов до отказа, периодах восстановления их работоспособности, стратегиях обслуживания и т. д. Таким образом, задачи организации обслуживания систем являются комплексными задачами, в которых требуется организовать и вести наблюдение за эксплуатационными параметрами системы и ее элементов, осуществлять обработку информации с целью определения параметров модели, формировать модель, решать оптимизационную задачу, принимать решения и внедрять их в практику управления эксплуатацией систем. В программе эксплуатации сложной системы помимо указанных работ необходимо также предусмотреть ее взаимодействие с операторами и другими системами, участвующими в решении общих задач, учет различных режимов работы, перестройку структуры системы при возникновении нарушений, организацию ремонтов, модернизацию и продление ресурса системы.

Задачи массового обслуживания рассматривают вопросы образования и функционирования очередей. Для образования очереди необходим поток требований, которые ожидают поступления в обслуживающее устройство (обслуживающий канал). Под очередь подразумевают линейную цепочку выстроившихся один за другим объектов, нуждающихся в том или ином обслуживании. Объекты, подлежащие обслуживанию, называются заявками или требованиями на обслуживание. Объекты, осуществляющие обслуживание, называются обслуживающими каналами. В различных областях практической деятельности возникают ситуации, когда клиенты вынуждены ожидать своей очереди на обслуживание. Это относится к таким сферам деятельности, как средства связи (телефония, почта, телеграф), транспортные системы, предприятия обслуживания (театры, рестораны, ремонтные мастерские), системы медицинского обслуживания, производственные процессы, процессы управления большими системами и т. д. Таким образом, можно сделать вывод о том, что задачи массового обслуживания обладают рядом особенностей, согласно которым их можно отнести к задачам системного анализа. Эти задачи включают в себя необходимость проведения статистического анализа эмпирических данных, комплексных исследований операционных характеристик, учет человеческого фактора при организации работы систем массового обслуживания и принятии управленческих решений и, наконец, разработки оптимизационных критериев задачи массового обслуживания.

Что касается задач анализа риска и безопасности использования новых технологий, то в настоящее время происходит быстрое развитие качественно новых технологий, таких как добыча нефти на морском шельфе, ядерная энергетика, производство и транспортировка сжиженного газа, новые химические производства. Их функционирование связано с производством и транспортировкой новых материалов, большого количества энергии. При этом критерии экономической эффективности влияют на увеличение единичной мощности используемого оборудования, усиление концентрации производства, приближение новых промышленных объектов к потребителям продукции. Совокупность указанных факторов приводит к тому, что последствия аварийных ситуаций на этих производствах при неблагоприятных условиях могут оказаться катастрофическими. Хотя вероятность их воз-

никновения очень низка, сами они и их последствия могут повлечь за собой крупные экономические потери, представлять серьезную угрозу экологии целых регионов и, что самое главное, жизни значительного количества людей.

Меры, направленные на увеличение безопасности используемого оборудования и уменьшение вероятности неблагоприятных событий и их последствий, требуют больших дополнительных затрат и не могут, как правило, абсолютно исключить возможность аварий. В связи с этим возникает необходимость исследования широкого круга задач, связанных с принятием обоснованных, рациональных решений с учетом факторов риска.

Имевшие место крупномасштабные технологические аварии значительно усилили внимание к данной проблеме как со стороны специалистов, так и со стороны общественности и средств массовой информации. В связи с этим исследования вопросов риска и безопасности стали охватывать все аспекты человеческого существования, всей окружающей человека среды обитания и постепенно оформились в новое научное направление, получившее название «анализ риска».

Исследования по анализу риска включают в себя широкий спектр взаимосвязанных проблем. При этом основными являются измерение риска, определение допустимого уровня риска, меры по предотвращению аварий, управление в условиях аварийных ситуаций.

Решение задачи анализа риска происходит, как правило, в условиях недостаточности или частичного отсутствия необходимой информации, особенно когда речь идет о новых технологиях. В этих случаях для получения количественных оценок показателей риска используют экспертные оценки, методы моделирования, строят «деревья отказов», пытаются смоделировать возможные причины сбоев в сложных технических системах. В случае новых технологий, когда отсутствует сколько-нибудь надежная статистика, на всех этапах анализа используют в том или ином виде экспертные оценки вероятностных событий. В то же время известно, что человек является «плохим статистиком». Решение вероятностных задач представляет для него сложную проблему, с которой он не всегда хорошо справляется. Следовательно, в процессе измерения риска необходимо учитывать реальные возможности получения надежных экспертных оценок.

Одним из наиболее распространенных способов измерения риска надежности сложных технических систем является построение «дереьев отказов». При этом определяются возможные поломки или отказы в системе и прослеживаются причинно-следственные цепочки вплоть до события, к которому эти отказы могут привести. Использование вероятностных оценок таких отказов дает возможность оценить в количественной форме вероятности соответствующих аварийных событий.

Авария сложного объекта может быть следствием различных причин, которые допустимо условно разделить на две основные группы: технические причины, обусловленные недостатками в используемых технологических схемах или дефектами оборудования, и причины, связанные с неадекватным, несвоевременным, некачественным или ненадежным исполнением своих функций человеком-оператором или, иными словами, так называемым «человеческим фактором». Анализ многочисленных аварий показывает, что значительная их часть обусловлена неправильным поведением операторов и другого обслуживающего персонала. В связи с этим в настоящее время наряду с решением задач по повышению надежности оборудования все больше внимания уделяется особенностям поведения операторов сложных технических систем в чрезвычайных ситуациях.

Проведенные исследования обнаружили удивительную схожесть «сценариев» многих крупных аварий [3]. Развитие ситуации, как правило, начинается с накопления ряда отклонений в поведении объекта. Затем следует какое-либо инициирующее событие, сопровождаемое неправильным управляющим воздействием со стороны оператора, которое и приводит к чрезвычайной ситуации. При этом именно ошибка оператора, как правило, значительно усугубляет последствия аварийной ситуации.

Подобные ошибки являются следствием нескольких причин. Во-первых, ни один специалист не обладает исчерпывающими знаниями об особенностях функционирования сложного объекта. Во-вторых, в процессе работы оператора происходит привыкание его как к нормальному функционированию управляемого им объекта, так и к небольшим отклонениям. Поэтому с течением времени оператор допускает все большие отклонения, с которыми он уже не может совладать, когда система выходит из-под контроля. Другими словами, наблюдается традиционный способ обучения «методом проб и ошибок», который

оказывается недопустимо дорогим при освоении новых технологий. В связи с этим сегодня все большее внимание уделяется вопросам специальной подготовки операторов, разработке специальных тренажеров, систем поддержки принятия решений, способных оказать оператору эффективную помощь. Особое значение приобретает проблема адекватного информационного обеспечения оператора с учетом его возможностей по переработке больших объемов информации.

Одновременно с этим предпринимаются значительные усилия и в области повышения надежности и безопасности используемого оборудования. Для этого дублируются наименее надежные и наиболее критические с точки зрения безопасности элементы технологических систем, производится замена опасных веществ на менее токсичные соединения и т. п.

Таким образом, особенности задачи анализа риска позволяют рассматривать ее как задачу системного анализа, заключающуюся в принятии сложного многокритериального коллективного решения, требующего исследования широкого круга вопросов и проведения комплексного анализа и оценки технических, экономических, социальных и даже политических факторов риска. При этом основной ее особенностью является доминирование социально-психологических аспектов, вовлеченность в ее решение групп людей со своими оценками и предпочтениями.

Итак, рассмотрено несколько типовых задач. Первый шаг любой задачи – это ее формализация, описание с помощью языка математики. От того, насколько успешно формализована задача, зависит судьба всех системных исследований. Простое описание делает анализ простым, но если оно не будет в достаточной степени адекватно реальности, то результат исследования, основанного на таких моделях, будет иметь сомнительную достоверность. С другой стороны, переусложненная задача, учитывающая разнообразные детали исследуемых процессов и с большими подробностями описывающая реальность, может привести к большим затратам времени, необходимого для исследований, и высокая точность моделей может оказаться неоправданной, а результат неприемлемым по времени его получения. И еще одна из сложностей, возникающих при проведении системных исследований, – это учет так называемого «человеческого фактора».

5.2. Сбор данных о функционировании системы

Чтобы построить модель системы, которая имела бы возможность отражать свойства и характеристики системы, реализующиеся в процессе ее функционирования во времени, необходимо помимо структуры знать ее параметры, поэтому следующим этапом работ при проведении системного анализа является сбор данных о функционировании системы и исследование информационных потоков.

Параметры системы подразделяются на внешние и внутренние [3], [14].

Внешние параметры системы – характеристики ее функционирования, служащие показателями качества ее работы как единого целого. В качестве примера внешних параметров можно привести параметры автоматизированной системы: общая производительность системы по обработке данных; объем передаваемой информации; точность получения результатов (для информации, заданной количественно); количественные характеристики надежности системы; объем используемой в системе аппаратуры (объем памяти, количество преобразователей формы информации, количество внешних устройств и т. д.); время задержки с момента поступления в систему исходных данных до момента выдачи окончательных результатов (во время решения определенной задачи); стоимость системы (с учетом разработки математического обеспечения); показатели удобства системы в эксплуатации и др.

Внутренние параметры системы – характеристики, показывающие особенности технических решений, принятых при организации системы в целом и отдельных технических средств, входящих в состав системы, а также в совокупности влияющие на значения внешних параметров системы. Примерами внутренних параметров автоматизированных систем являются: способ кодирования информации; вид приоритетности при приеме и обработке информации от различных источников; быстродействие отдельных элементов и т. д.

Разделение на внешние и внутренние параметры весьма условно. Обычно к внешним относят те параметры, на которые задаются ограничения, определяемые назначением системы или вызванные условиями ее функционирования. Параметры отражают свойства системы. Одни из них определить достаточно просто, например, такие параметры, как объем памяти, количество внешних устройств, стоимость

системы, способ кодирования информации, вид приоритетности при приеме и обработке информации от различных источников, можно получить на основании изучения документации на систему. Другие же параметры определяются опосредованно, на основании обработки информации, полученной в результате наблюдений за работой системы. К ним относятся параметры, характеризующие надежность системы, качество функционирования, точность получения количественных результатов и т. п.

Наблюдения с целью сбора данных могут проводиться в процессе функционирования системы, или для сбора данных организуются специальные экспериментальные исследования. В первом случае говорят, что данные получены в результате пассивного эксперимента, т. е. изучаются следующие виды документов: официальные положения и инструкции, регламентирующие функции подразделений и определяющие сроки и процедуры обработки информации и принятия решений; систематически обновляемые записи в виде картотек или книг, используемые в процессе работы; промежуточные документы, получаемые и используемые в процессе обработки данных, и т. д. Во втором случае имеет место активный эксперимент. Активный эксперимент проводится по специально составленному плану с использованием методов планирования эксперимента. При этом предусматривается возможность изменения входных параметров, влияющих на процесс функционирования системы. Исследуется изменение выходных параметров системы в зависимости от уровней входных параметров. Результаты испытаний фиксируются с помощью измерений, т. е. изображения результатов опыта в виде символов, номеров или чисел. Требуемая информация в виде оценок параметров получается путем преобразования результатов измерения или, как еще говорят, с помощью обработки экспериментальных данных.

5.3. Построение моделей системы

Одной из основных задач является построение модели системы.

Моделью называют некий объект, который в определенных условиях может заменять оригинал, воспроизводя интересующие свойства и характеристики оригинала. Создание модели системы позволяет предсказывать ее поведение в определенном диапазоне условий. По-

нятие модели связано с наличием какого-либо сходства между выбранными объектами, один из которых является оригиналом, а другой – его образом, выполняющим роль модели. Модели являются всегда упрощенным описанием системы.

В настоящее время применяются различные виды классификаций методов моделирования, один из видов представлен на рис. 5.1 [3], [4], [5], [10], [14].



Рис. 5.1. Классификация методов моделирования систем

В зависимости от характера изучаемых процессов в системе все виды моделирования могут быть разделены на детерминированные, стохастические и игровые, статические и динамические. Детерминированное моделирование отображает детерминированные процессы, т. е. процессы, в которых предполагается отсутствие всяких случайных воздействий. Вероятностные модели (стохастические) описывают поведение системы в условиях воздействия случайных факторов. Следовательно, такие модели оценивают будущие состояния системы с позиций вероятностей реализации тех или иных событий. Игровые модели дают возможность изучать конфликтные ситуации, в которых каждая из конфликтующих сторон придерживается своих взглядов и характер поведения каждой из них диктуется личными интересами. Статическое моделирование служит для описания поведения объекта в какой-либо момент времени, а динамическое моделирование отражает поведение объекта во времени. Динамические модели находят более широкое применение, чем статические.

Модели бывают материальные и абстрактные. Разновидностью абстрактных моделей являются математические модели. Для исследования характеристик процесса функционирования любой системы S математическими методами, включая и машинные, должна быть проведена формализация этого процесса, т. е. построена математическая модель.

Под математическим моделированием будем понимать процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторого математического объекта, называемого математической моделью, и исследование этой модели, позволяющее получать характеристики рассматриваемого реального объекта. Любая математическая модель, как и всякая другая, описывает реальный объект лишь с некоторой степенью приближения к действительности. Математическое моделирование для исследования характеристик процесса функционирования систем можно разделить на аналитическое, имитационное и комбинированное.

Для аналитического моделирования характерно то, что процессы функционирования элементов системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, дифференциальных и т. п.) или логических условий. Аналитическое моделирование позволяет получить выходные результаты в виде конкретных аналитических выражений. Наиболее полное исследование процесса функционирования системы можно провести, если известны явные зависимости, связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы S . Однако такие зависимости удается получить только для сравнительно простых систем. При усложнении систем исследование их аналитическим методом наталкивается на значительные трудности, которые часто бывают непреодолимыми. Поэтому, желая использовать аналитический метод, идут на существенное упрощение первоначальной модели, чтобы иметь возможность изучить хотя бы общие свойства сложной системы, например, оценить устойчивость системы, характеристики надежности и т. п. Для построения математических моделей имеется мощный математический аппарат (функциональный анализ, исследование операций, теория вероятностей, математическая статистика, теория массового обслуживания и т. д.).

Когда явления в сложной системе сложны и многообразны, так что аналитическая модель становится слишком грубым приближением к действительности, то используют имитационное моделирование

чаще всего с помощью мощных и быстродействующих компьютеров. В имитационной модели поведение компонентов сложной системы описывается набором алгоритмов, которые реализуют ситуации, возникающие в реальной системе. В этом случае для предсказания поведения реальной сложной системы необходим эксперимент, имитация на модели при заданных исходных параметрах. Имитация представляет собой численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложной системы в течение заданного или формируемого периода времени. Термин «имитационная модель» используют в том случае, когда речь идет о проведении численных расчетов и, в частности, о получении статистической выборки на математической модели, например, для оценки вероятностных характеристик некоторых выходных параметров. Моделирование на системном уровне применяется в системном анализе для проведения расчетов характеристик будущей системы. Имитируя различные реальные ситуации на модели, можно получить возможность решения таких задач, как оценка эффективности тех или иных принципов управления системой, сравнение вариантов структурных схем. Примерами расчетов на имитационных моделях также могут служить вычисления характеристик производительности, надежности и т. п., которые необходимо определить как функции внутренних и внешних параметров системы. Таким образом, при имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы S во времени, причем имитируются элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени, что позволяет по исходным данным получить сведения о состояниях процесса в определенные моменты времени, дающие возможность оценить характеристики системы S . Основным преимуществом имитационного моделирования по сравнению с аналитическим является возможность решения более сложных задач. В настоящее время имитационное моделирование – наиболее эффективный метод исследования больших систем, а часто и единственный практически доступный метод получения информации о поведении системы, особенно на этапе ее проектирования [3], [4], [5], [9], [14].

Когда результаты, полученные при воспроизведении на имитационной модели процесса функционирования системы S , являются

реализациями случайных величин и функций, тогда для нахождения характеристик процесса требуется его многократное воспроизведение с последующей статистической обработкой информации, поэтому целесообразно в качестве метода машинной реализации имитационной модели использовать метод статистического моделирования.

Первоначально был разработан метод статистических испытаний, представляющий собой численный метод, который применялся для моделирования случайных величин и функций, вероятностные характеристики которых совпадали с решениями аналитических задач (такая процедура получила название метода Монте-Карло). Затем этот прием стали применять и для машинной имитации с целью исследования характеристик процессов функционирования систем, подверженных случайным воздействиям, т. е. появился метод статистического моделирования [21]. В методе Монте-Карло на вычислительной машине моделируется действительный ход процесса и, после того как над этим процессом проведены достаточно длительные наблюдения, делаются оценки желаемых показателей надежности. Таким образом, в этом методе моделирование рассматривается как последовательность реальных экспериментов [9]. Основным недостатком данного метода — громадное число испытаний, необходимых, как правило, для того, чтобы получить приемлемый уровень точности вычисления показателей надежности системы. Из-за этого решение задачи методом Монте-Карло обходится весьма дорого и занимает много машинного времени.

Комбинированное (аналитико-имитационное) моделирование при анализе и синтезе систем позволяет объединить достоинства аналитического и имитационного моделирования. При построении комбинированных моделей проводится предварительная декомпозиция процесса функционирования объекта на составляющие подпроцессы и для тех из них, где это возможно, используются аналитические модели, а для остальных подпроцессов строятся имитационные модели. Такой комбинированный подход позволяет охватить качественно новые классы систем, которые не могут быть исследованы с использованием только аналитического и имитационного моделирования в отдельности.

Материальное моделирование подразделяется на аналоговое и реальное. В основу аналогового моделирования положено совпадение математического описания различных предметов, процессов и явле-

ний. Характерным примером аналоговых моделей служат механические и электрические колебания, которые подчинены одним и тем же законам, т. е. описываются одинаковыми аналитическими формулами, но относятся к качественно различным физическим процессам.

При реальном моделировании используется возможность исследования различных характеристик либо на реальном объекте целиком, либо на его части. Такие исследования могут проводиться как на объектах, работающих в нормальных режимах, так и при организации специальных режимов для оценки интересующих исследователя характеристик (при других значениях переменных и параметров, в другом масштабе времени и т. д.). Реальное моделирование является наиболее адекватным, но при этом его возможности с учетом особенностей реальных объектов ограничены. Реальное моделирование нашло широкое применение в авиа-, автомобиле-, ракето- и судостроении, а также в других отраслях промышленности и транспорта. Например, при разработке нового летательного аппарата большое значение имеют эксперименты с натурными образцами или моделями в аэродинамической трубе. Исследование полученных там результатов их обтекания воздушным потоком позволяет найти наиболее рациональные формы корпуса самолета либо ракеты и всех их выступающих частей.

В настоящее время в задачах системного анализа широкое применение получили математические модели. Это обусловлено универсальностью подхода к анализу как систем в целом, так и явлений и процессов, происходящих в них, способностью отразить все разнообразие закономерностей их развития и поведения. При применении математического моделирования появляется возможность проведения глубокого анализа задачи, обнаружения ошибок и корректировки исходных постулатов. При этом затраты на проведение исследований существенно меньше по сравнению с аналогичными исследованиями на реальных объектах. Если к тому же учесть, что ряд исследований на реальных объектах провести нет возможности по причине физической нереализуемости, ввиду больших материальных затрат или нежелательных последствий, наступаемых в результате завершения исследований, то становится понятным, что исследование на математических моделях является чуть ли не единственным способом решения поставленных задач. Понятна нежелательность, мягко говоря, проведения натуральных испытаний по установлению при-

чин, приводящих к авариям на атомных электростанциях. Такие исследования проводят исключительно на моделях.

Математические модели могут иметь вид формул, систем уравнений или неравенств, логических выражений, графических образов, отражающих зависимость между выходными параметрами, состояниями системы, входными параметрами и управляющими воздействиями. Анализируемая система может быть описана разными моделями, каждая из которых обладает характерными свойствами и пригодна для решения лишь определенного круга задач, относящихся к структуре и функционированию системы.

5.4. Проверка адекватности моделей

После того как модель построена, необходимо удостовериться в ее качестве. Для этого выполняют ряд операций: проверка адекватности модели процессу, объекту или явлению, для которых она построена; проверка непротиворечивости модели, неопределенности, чувствительности, реалистичности и работоспособности [3].

Проверить адекватность модели — это значит установить, насколько хорошо модель описывает реальные процессы, происходящие в системе, насколько качественно она будет прогнозировать развитие данных процессов. Проверка адекватности модели проводится на основании некоторой экспериментальной информации, полученной на этапе функционирования системы или при проведении специального эксперимента, в ходе которого наблюдаются интересующие системного аналитика процессы. Проверка адекватности модели заключается в доказательстве факта, что точность результатов, полученных по модели, будет не хуже точности расчетов, произведенных на основании экспериментальных данных.

Поскольку модель системы только стремится отобразить реальность, неизбежно существование упрощений, допущений и идеализаций сложных процессов и явлений, происходящих в системе. Следствием этих упрощений и идеализаций будут неопределенности в итоговых результатах, получаемых в процессе применения модели. Выделяют следующие источники неопределенностей в соответствующих моделях: обусловленные неполнотой моделей, неадекватностью моделей и неопределенностью исходных параметров.

Неопределенности, обусловленные неполнотой моделей, возникают из-за того, что при построении моделей системный аналитик не предусмотрел некоторые стороны развития моделируемых процессов, происходящих в системе. Иными словами, при разработке модели системы не были учтены отдельные особенности существования и развития систем. Это может быть сделано сознательно, когда аналитик считает, что данные особенности системы не играют большой роли и ими можно пренебречь. Иногда это происходит в результате недостаточной проработанности вопросов, связанных с изучением структуры и динамического поведения систем. В результате имеется недостаток полноты модели, который приводит к неопределенности в результатах и выводах и который трудно проанализировать и определить количественно.

Второй тип неопределенностей связан с неадекватностью моделей. Даже в тех случаях, когда в модели учтены все особенности существования и развития систем, последовательность событий и логические особенности функционирования систем, заложенные в модель, не совсем точно отражают реальность. Существуют неопределенности, вызванные ошибками в вычислительных программах и ограничениями вычислительного процесса. Эти неопределенности рассматриваются как часть анализа неопределенности моделей; для оценки их относительной значимости проводятся исследования чувствительности результатов моделирования.

Третий тип неопределенностей — неопределенность исходных параметров. Параметры различных моделей точно не известны. Причинами этого являются недостаточность данных, используемых при статистическом оценивании входных параметров, невозможность точного описания поведения персонала, работающего в составе анализируемой системы, наличие допущений, принятых при составлении модели.

Анализом чувствительности модели называют процедуру оценки влияния допусков входных параметров на ее выходные характеристики. Проводят анализ чувствительности следующим образом: задают отклонение входного параметра в правую и левую стороны от его среднего значения и фиксируют, как при этом изменяются выходные значения характеристик модели. Практическая сторона анализа чувствительности модели к изменению входных параметров состоит в том, что устанавливается степень зависимости выходных параметров от вход-

ных характеристик. Эту степень влияния затем можно проранжировать и выявить наиболее значимые входные параметры. Если в ходе проверки модели на чувствительность к изменению входных параметров установлено, что ряд параметров приводят к незначительным изменениям выходных характеристик, сравнимых с точностью проведения расчетов на модели, то данные входные параметры можно вывести из модели. Таким образом, анализ чувствительности модели может привести к упрощению модели и исключению из нее незначимых факторов.

Одним из способов проверки реалистичности модели может служить метод прогнозирования назад, т. е. в модели задаются требуемые входные параметры, и производится расчет некоторого события, которое уже имело место, или же рассчитываются характеристики системы на время, которое система отработала, — оценки этих характеристик можно получить по реальным данным. Если результаты расчета на модели дают хорошее совпадение с практикой, можно считать, что модель реалистична.

Цель анализа работоспособности модели — выяснить, насколько модель практична и удобна в эксплуатации. Во-первых, модель должна обеспечивать результат за разумное время. Во-вторых, трудозатраты и ресурсы, требуемые для эксплуатации модели, должны укладываться в установленные лимиты машинного времени. Следующий аспект проверки модели связан с анализом допущений и предположений, принятых при построении модели. На этом этапе проверки работоспособности оцениваются качество модели, ее свойства в условиях воздействия реальных внешних возмущений и параметров, так как принятие некоторых допущений и ограничений может привести к тому, что модель не будет отражать сути происходящих явлений и процессов. Следует отметить, что эта задача взаимосвязана с задачей проверки неадекватности модели.

5.5. Исследование ресурсных возможностей

Для того чтобы модель начала давать результаты, чтобы она заработала, необходимы затраты ресурсов. Модель нужно не только воплотить в надлежащем виде, но и обеспечить возможность получения решения нужного качества и к нужному моменту времени. Поэтому при реализации моделей необходимы ресурсы, которые позволяют обеспечить выполнение условий качества и своевременности. Рассмотрим основ-

ные виды ресурсов, используемых при реализации задач системного анализа. Выделяют энергетические, материальные, временные и информационные ресурсы. Обычно энергетические затраты на реализацию модели значительно меньше, чем затраты энергии, потребляемые самой системой, для которой разработана модель. Поэтому в обычной ситуации энергетическими ресурсами, как правило, пренебрегают. Следующий вид ресурсов – материальные ресурсы, которые представляют собой достаточно обширную категорию. Сюда можно отнести и людские ресурсы, требуемые для реализации моделей, и ресурсы обеспечения проводимых исследований необходимым оборудованием, приборами и инструментами, и канцелярские товары и принадлежности, и т. п. Что касается временных ресурсов, то обычно исследования, проводимые с помощью моделей, должны по времени укладываться в рамки, оговоренные договором, который заключается между заказчиком работ и исполнителем. Наконец, информационные ресурсы. Количество и качество информации, используемой при построении моделей систем, различно. Если при построении модели используется достоверная информация в достаточно представительном объеме, это является одним из условий построения хорошей модели. В свою очередь, ограниченность информации приводит к значительной неопределенности результатов, получаемых в ходе расчетов на модели.

Таким образом, при построении и реализации моделей следует уделять внимание обеспечению процесса использования моделей всеми видами ресурсов.

5.6. Определение целей системного анализа

В системном анализе после того, как сформулирована проблема, которую требуется преодолеть в ходе его выполнения, переходят к определению цели. Цель – одно из наиболее сложных понятий, изучению которого уделяется большое внимание в философии, психологии, кибернетике, теории систем.

Анализ определений цели и связанных с ней понятий показывает, что в зависимости от стадии познания объекта, этапа системного анализа в понятие «цель» привносят различные оттенки – от идеальных устремлений (цель – выражение активности сознания) до конкретных целей – конечных результатов, достижимых в пределах некоторого

интервала времени, формируемых иногда даже в терминах конечного продукта деятельности [3].

Определить цель системного анализа — это означает ответить на вопрос, что надо сделать для снятия проблемы. Сформулировать цель — значит указать направление, в котором следует двигаться, чтобы разрешить существующую проблему, показать пути, которые уведут от существующей проблемной ситуации (разрешают проблемную ситуацию).

Формулируя цель, требуется всегда отдавать отчет в том, что она имеет активную роль в управлении. В определении цели было отражено, что цель — это желаемый результат развития системы. Таким образом, сформулированная цель системного анализа будет определять весь дальнейший комплекс работ. Следовательно, цели должны быть реалистичны. Задание реалистичных целей направит всю деятельность по выполнению системного анализа на получение определенного полезного результата. Важно также отметить, что представление о цели зависит от стадии познания объекта, и по мере развития представлений о нем цель может быть переформулирована. Изменение целей во времени может происходить не только по форме, в силу все лучшего понимания сути явлений, происходящих в исследуемой системе, но и по содержанию, вследствие изменения объективных условий и субъективных установок, влияющих на выбор целей. Сроки изменения представлений о целях, старения целей различны и зависят от уровня иерархии рассмотрения объекта. Цели более высоких уровней долговечнее. Динамичность целей должна учитываться в системном анализе.

При формулировании цели нужно учитывать, что на нее оказывают влияние как внешние по отношению к системе факторы, так и внутренние. При этом внутренние факторы являются такими же объективно влияющими на процесс формирования цели факторами, как и внешние.

Далее следует отметить, что даже на самом верхнем уровне иерархии системы имеет место множественность целей. Анализируя проблему, необходимо учитывать цели всех заинтересованных сторон. Среди множества целей желательно попытаться найти или сформировать глобальную цель. Если этого сделать не удастся, следует проранжировать цели в порядке их предпочтения для снятия проблемы в анализируемой системе.

5.7. Формирование критериев

Критерий — это способ сравнения альтернатив. Необходимо различать понятия «критерий» и «критериальная функция». Критерием качества альтернативы может служить любой ее признак, значение которого можно зафиксировать в порядковой или более сильной шкале. После того как критерий сформирован, т. е. найдена характеристика, которая будет положена в основу сравнения альтернатив, появляется возможность ставить задачи выбора и оптимизации. Задача формирования критериев решается непосредственно после того, как сформулированы цели системного анализа.

Обсуждая вопрос формирования критериев, следует сказать, что это достаточно трудная и серьезная задача. Редко бывает так, что решение лежит на поверхности. Зачастую для формирования хорошего критерия, адекватно отражающего цель системного анализа, приходится прибегать к неформализуемым процедурам. Неформализуемые, творческие этапы играют важную роль в процессе формирования критериев. При решении задач системного анализа возникает ситуация, когда невозможно предложить один критерий, адекватно отражающий цель исследования: даже одну цель редко удается выразить одним критерием, хотя к этому необходимо стремиться. Критерий, как и всякая модель, лишь приближенно отображает цель; адекватность одного критерия может оказаться недостаточной. Поэтому решение может состоять не обязательно в поиске более адекватного критерия, оно может выражаться в использовании нескольких критериев, описывающих одну цель по-разному и дополняющих друг друга. Еще более усложняется задача в случае, когда сформулировано несколько целей системного анализа, отражающих разные системы ценностей. В этом случае необходимо формировать несколько критериев и в последующем решать многокритериальную задачу. Таким образом, можно отметить, что многокритериальность является способом повышения адекватности описания цели. Критерии должны описывать по возможности все важные аспекты цели, но при этом желательно минимизировать число необходимых критериев.

При постановке и решении задач системного анализа необходимо учитывать не только цели, на решение которых они направлены, но и возможности, которыми обладают стороны для решения поставлен-

ных задач и которые позволяют снять выявленные проблемы. В первую очередь необходимо учитывать ресурсы, имеющиеся у сторон. К ним следует отнести денежные ресурсы, которые заказчик согласен выделить системным аналитикам для решения поставленной задачи; ресурсы исполнителя — людские, вычислительные, материальные, требуемые для решения задач (например, наличие канцелярских товаров, транспорта, связи); временные ресурсы (сроки решения задач системного анализа, как правило, оговариваются). При формулировке задачи системного анализа необходимо также учитывать интересы окружающей среды. Хотя окружающая среда и играет пассивную роль, необходимо учитывать, что любая система существует внутри нее, взаимодействует с ней. Чтобы выполнить условие непревышения количества имеющихся ресурсов, в постановку задачи системного анализа вводят ограничения.

Между целевыми критериями и ограничениями имеются сходство и различия. Общее заключается в том, что и критерий, и ограничения являются математической формулировкой некоторых условий. В некоторых задачах оптимизации они могут выступать равноправно. Однако на этапе формирования целевой критерий открывает возможности для генерирования новых альтернатив в поисках лучшей из них, а ограничение заведомо уменьшает их число, запрещая некоторые из них. Одними целевыми критериями можно жертвовать ради других, ограничения же исключить нельзя, они должны четко соблюдаться. При формулировании задач системного анализа встречаются случаи, когда ограничения задаются завышенными. Это может привести к нереальности достижения целей системного анализа. В этом случае необходимо ставить вопрос об ослаблении ограничений. Например, слишком высокие требования к характеристикам надежности системы могут привести к необходимости чрезвычайных дополнительных финансовых вложений. А это, в свою очередь, может привести к неэффективности разработки и эксплуатации объекта, для которого проводится анализ. Таким образом, формулируя ограничения, необходимо руководствоваться соображениями здравого смысла. После проведения определенных вычислений и установления факта завышенности требований, сформулированных в ограничениях, можно эти требования ослабить и попытаться решить задачу заново.

В заключение перечислим основные критерии, наиболее часто встречающиеся в анализе сложных технических систем. Это экономические критерии – прибыль, рентабельность, себестоимость; технико-экономические – производительность, надежность, долговечность; технологические – выход продукта, характеристики качества и пр.

5.8. Генерирование альтернатив

Следующим этапом системного анализа является создание множества возможных способов достижения сформулированной цели. Иными словами, на данном этапе необходимо сгенерировать множество альтернатив, из которых затем будет осуществляться выбор наилучшего пути развития системы [3], [4], [5]. Данный этап системного анализа является очень важным и трудным. Важность его заключается в том, что конечная цель системного анализа состоит в выборе наилучшей альтернативы на заданном множестве и в обосновании этого выбора. Трудность этапа обусловлена необходимостью генерации достаточно полного множества альтернатив, включающего в себя, на первый взгляд, даже самые нереализуемые.

Генерирование альтернатив, т. е. идей о возможных способах достижения цели, является настоящим творческим процессом. Существует ряд рекомендаций о возможных подходах к выполнению рассматриваемой процедуры. Необходимо сгенерировать как можно большее число альтернатив. Имеются следующие способы генерации [14]:

- 1) поиск альтернатив в патентных и журнальных изданиях;
- 2) привлечение нескольких экспертов, имеющих разную подготовку и опыт;
- 3) увеличение числа альтернатив за счет их комбинации, образования промежуточных вариантов между предложенными ранее;
- 4) модификация имеющейся альтернативы, т. е. формирование альтернатив, лишь частично отличающихся от известной;
- 5) включение альтернатив, противоположных предложенным, в том числе и «нулевой» альтернативы (не делать ничего, т. е. рассмотреть последствия развития событий без любого вмешательства);
- 6) интервьюирование заинтересованных лиц и более широкие анкетные опросы;

- 7) включение в рассмотрение даже тех альтернатив, которые на первый взгляд кажутся надуманными;
- 8) генерирование альтернатив, рассчитанных на различные интервалы времени (долгосрочные, краткосрочные, экстренные).

Применяются различные методы, используемые в системном анализе, для проведения работы по формированию множества альтернатив, например методы коллективной генерации идей, разработка сценариев, морфологические методы, деловые игры, методы экспертного анализа, метод «Дельфи», методы типа дерева целей [3], [4], [5], [9], [14].

5.9. Реализация выбора и принятия решения

Целевое предназначение всего системного анализа состоит в том, чтобы в результате осуществить выбор [3]. Выбор или принятие решения есть суть поставленной задачи системного анализа, конечный итог всей работы. Заказчик формулирует перед системным аналитиком проблему. Его интересуют прагматичные вопросы, например, сформулировать мероприятия, которые гарантировали бы быстрое развитие предприятия с обеспечением максимальной прибыли, или же предложить наилучшее решение по обеспечению стабильного электроснабжения некоторого региона. Системный аналитик должен ответить на вопросы: «Что лучше – строить новую электростанцию или провести модернизацию действующей, но выработавшей свой ресурс? Какова будет надежность электростанции после проведения работ по модернизации? Будет ли на допустимом уровне риск от ее эксплуатации?» Заказчика в общем-то не интересует, каким способом будет выработано то или иное решение. Для него важно, чтобы оно было обосновано и отвечало на поставленный вопрос.

Все описанные ранее этапы работ являлись предварительными, направленными на изучение проблемной ситуации. Для того чтобы обоснованно подойти к решению задачи выбора, анализируется система и строится ее модель, изучаются цели, которые ставит перед собой (и, естественно, системными аналитиками) заказчик, исследуются возможные пути развития системы, т. е. генерируются альтернативы.

После столь тщательной проработки проблемной ситуации наступает завершающий этап – этап принятия решения. Процедура принятия решения представляет собой действие над множеством альтер-

натив, в результате которого получается подмножество выбранных альтернатив. Но желательно, чтобы это была одна альтернатива. Сравнение множества альтернатив возможно, если есть способ сравнения альтернатив между собой и определения наиболее предпочтительных. Для того чтобы имелась возможность сравнивать альтернативы, необходимо выработать критерий предпочтения. Проблема выбора сама по себе достаточно сложна. Она допускает существенно различающиеся математические постановки задач. Отметим основные сложности, возникающие при решении задач выбора и принятия решений:

- множество альтернатив может быть конечным, счетным или бесконечным;
- оценка альтернативы может осуществляться по одному или по нескольким критериям;
- критерии могут иметь количественное выражение или допускать только качественную оценку;
- режим выбора может быть однократным или повторяющимся, допускающим обучение на опыте;
- последствия выбора могут быть точно известны, могут иметь вероятностный характер или неоднозначный исход, не допускающий введение вероятностей.

Различные сочетания перечисленных вариантов приводят к многообразным задачам выбора. Для решения задач выбора предлагаются различные подходы, наиболее распространенный из которых – критериальный подход. Основным предположением критериального подхода является следующее: каждую отдельно взятую альтернативу можно оценить конкретным числом – значением критерия. Критерии, на основе которых осуществляется выбор, имеют различные названия – критерий качества, целевая функция, функция предпочтений, функция полезности и т. д. Объединяет их то, что все они служат решению одной задачи – задачи выбора.

Сравнение альтернатив сводится к сравнению результатов расчетов соответствующих критериев. Если далее предположить, что выбор любой альтернативы приводит к однозначно определяемым последствиям и заданный критерий численно выражает оценку этих последствий, то наилучшей альтернативой является та, которая обладает наибольшим значением критерия. Задача поиска наилучшей альтернативы, про-

стая по постановке, часто оказывается сложной для решения, поскольку метод ее решения определяется размерностью и типом множества альтернатив, а также видом критериальной функции. Однако на практике сложность отыскания наилучшей альтернативы многократно возрастает, так как оценивание вариантов приходится проводить на основании нескольких критериев, качественно различающихся между собой. Если в результате сравнения по нескольким критериям получилось, что одна альтернатива обладает наилучшими значениями по всем критериям, то выбор не представляет затруднений, именно эта альтернатива и будет наилучшей. Однако такая ситуация встречается лишь в теории. На практике дело обстоит сложнее. В данной ситуации приходим к необходимости решения многокритериальных задач. Подходы к решению таких задач известны — это метод сведения многокритериальной задачи к однокритериальной, метод условной максимизации, поиск альтернативы с заданными свойствами. Выбор альтернативы на основании критериального подхода предполагает, что выполненными являются несколько условий: известен критерий, задан способ сравнения вариантов и метод нахождения лучшего из них. Однако этого оказывается недостаточно. При решении задач выбора необходимо учитывать условия, при которых осуществляется выбор, и ограничения задачи, так как их изменение может привести к изменению решения при одном и том же критерии.

Оптимизационный подход нашел широкое применение в задачах системного анализа. Это обусловлено тем, что понятие оптимальности получило строгое и точное представление в математических теориях. Оптимизационный подход прочно вошел в практику проектирования и эксплуатации технических систем, сыграл важную роль в формировании современных системных представлений, широко используется в административном управлении. Нахождение оптимальных вариантов особенно важно для оценки состояния современной техники и определения перспектив ее развития.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимизация — это мощное средство повышения эффективности, но использовать его необходимо осторожно, особенно при работе со сложными проблемными ситуациями. Проблема еще более обостряется, когда речь идет о принятии решений в организационных или социальных системах. Можно констатировать, что оптимизационные задачи, которые удается поста-

вить при исследовании сложных систем, имеют обоснованный характер, если описывают хорошо структурированные системы, и являются заведомо приближенными, если относятся к системе в целом. Поэтому отметим, что оптимизационный подход является не единственным при решении задач выбора и принятия решений. Существуют другие методы, которые дополняют оптимизационный выбор. Одним из таких методов является экспертный. Он применяется в тех случаях, когда при исследовании сложных систем возникают проблемы, которые не удается представить в виде формальных математических задач. В таких случаях прибегают к услугам экспертов — лиц, чьи интуиция и опыт могут уменьшить сложность проблемы. И наконец, для решения задач выбора в сложных проблемных ситуациях создаются специальные человеко-машинные, проблемно-ориентированные системы — системы поддержки решений, ориентированные не на автоматизацию функций лица, принимающего решение, а на предоставление ему помощи в проведении данной работы.

Подводя итог, отметим, что проблема выбора и принятия решений — центральная проблема системного анализа. Налицо сложности, которые возникают перед системным аналитиком. Но, с другой стороны, имеется развитый математический и эвристический аппарат, который является мощным оружием, помогающим обоснованно подходить к проблеме выбора.

5.10. Внедрение результатов анализа

Системный анализ является прикладной наукой, его конечная цель — изменение существующей ситуации в соответствии с поставленными целями. Окончательное суждение о правильности и полезности системного анализа можно сделать лишь на основании результатов его практического применения. Конечный результат будет зависеть не только от того, насколько совершенны и теоретически обоснованы методы, применяемые при проведении анализа, но и от того, насколько грамотно и качественно реализованы полученные рекомендации.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 30 с.
2. Анищенко, В.А. Надежность систем электроснабжения : учеб. пособие / В.А. Анищенко. – Минск : Технопринт, 2002. – 160 с.
3. Антонов, А.В. Системный анализ / А.В. Антонов. – М. : Высш. шк., 2006. – 454 с.
4. Анфилатов, В.С. Системный анализ в управлении / В.С. Анфилатов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин. – М. : Финансы и статистика, 2007. – 368 с.
5. Белов, П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. – М. : Академия, 2003. – 512 с.
6. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 7-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2000. – 479 с.
7. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1987. – 336 с.
8. Гук, Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю.Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
9. Дрогобыцкий, И.Н. Системный анализ в экономике / И.Н. Дрогобыцкий. – М. : Финансы и статистика, 2007. – 512 с.
10. Эксплуатация электрооборудования / Г.П. Ерошенко [и др.]. – М. : КолосС, 2008. – 344 с.
11. Ершов, А.М. Надежность систем электроснабжения промышленных предприятий : в 2 ч. / А.М. Ершов. – Челябинск : Изд-во ЧПИ, 1987. – Ч. 1. – 50 с.
12. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем : в 3 ч. Ч. 1. Теоретические основы / В.Г. Китушин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 256 с.
13. Острейковский, В.А. Теория надежности : учеб. для вузов / В.А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
14. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М. : Высш. шк., 1989. – 367 с.

15. Производство, передача и распределение электрической энергии : электротехнический справочник : в 4 т. / под общ. ред. В.Г. Герасимова [и др.]. – М. : Изд-во МЭИ, 2002. – Т. 3. – 964 с.
16. Розанов, М.Н. Надежность энергетических систем / М.Н. Розанов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
17. Синьчугов, Ф.И. Расчет надежности схем электрических соединений / Ф.И. Синьчугов. – М. : Энергия, 1971. – 176 с.
18. Степкина, Ю.В. Надежность систем электроснабжения / Ю.В. Степкина, А.А. Гришкевич. – Тольятти : ТГУ, 2005. – 85 с.
19. Фокин, Ю.А. Вероятностные методы в расчетах надежности электрических систем : учеб. пособие для вузов / Ю.А. Фокин. – М. : МЭИ, 1983. – 216 с.
20. Электрические системы и сети в примерах и иллюстрациях : учеб. пособие для электроэнергетических спец. / под ред. В.А. Строева. – М. : Высш. шк., 1998. – 352 с.
21. Эндрени, Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах : пер. с англ. / Дж. Эндрени. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| 1. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ..... | 4 |
| 1.1. Основные термины и определения..... | 4 |
| 1.2. Показатели надежности элементов..... | 6 |
| 1.3. Законы распределения, используемые в теории надежности..... | 10 |
| 1.4. Показатели надежности восстанавливаемых элементов..... | 11 |
| 2. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ..... | 14 |
| 2.1. Структурные схемы расчета надежности систем..... | 14 |
| 2.2. Последовательное соединение элементов..... | 14 |
| 2.3. Параллельное соединение элементов..... | 16 |
| 2.5. Надежность систем при постоянном раздельном резервировании..... | 19 |
| 2.6. Определение минимального числа резервных элементов..... | 20 |
| 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ..... | 21 |
| 3.1. Потоки отказов и восстановлений..... | 21 |
| 3.2. Марковские случайные процессы..... | 22 |
| 3.3. Расчет показателей надежности восстанавливаемых элементов..... | 26 |
| 3.4. Методы определения надежности..... | 28 |
| 3.5. Экспериментальные методы определения надежности..... | 29 |
| 4. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА..... | 31 |
| 4.1. Основные понятия и определения..... | 31 |
| 4.2. Классификация систем..... | 34 |
| 5. ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА..... | 40 |
| 5.1. Постановка задач системного анализа..... | 40 |
| 5.2. Сбор данных о функционировании системы..... | 48 |
| 5.3. Построение моделей системы..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 5.4. Проверка адекватности моделей..... | 55 |
| 5.5. Исследование ресурсных возможностей..... | 57 |
| 5.6. Определение целей системного анализа..... | 58 |
| 5.7. Формирование критериев..... | 60 |
| 5.8. Генерирование альтернатив..... | 62 |
| 5.9. Реализация выбора и принятия решения..... | 63 |
| 5.10. Внедрение результатов анализа..... | 66 |
| | |
| Библиографический список..... | 67 |

Учебное издание

Степкина Юлия Васильевна

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ
ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЁЖНОСТИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 04.02.2011. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 4,4. Уч.-изд. л. 4,1.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-79-10.

Тольяттинский государственный университет
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14