

ний, возможно получение значительного экономического эффекта, несмотря на начальные затраты, необходимые для приобретения дополнительной компьютерной техники и лицензий на программное обеспечение - CAD/CAE/CAM/ PLM – систем, составляющих комплекс CALS-технологий.

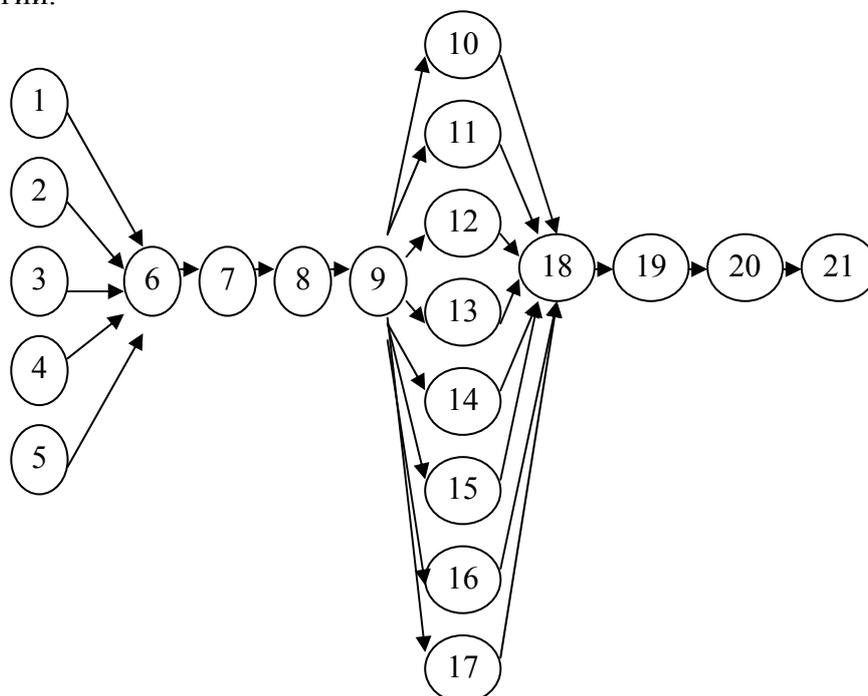


Рисунок 7 – Сетевой граф подпроцесса «Разработка и утверждение основополагающих конструкторских документов» после реинжиниринга

Отставание в развитии технологий сопровождения жизненного цикла изделий, означает для Российской промышленности в целом, и в частности для автомобилестроительных предприятий потерю конкурентоспособности выпускаемой продукции на мировом рынке.

Литература

1. Введение в экономико-математическое моделирование. Лотов А.В. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 392 с.
2. Прикладной системный анализ: сетевой анализ и календарное планирование проектов, метод прогнозного графа: Учеб. пособие. /Под ред. В.К. Буторина. НФИ КемГУ. – Новокузнецк, 2002. 59 с.
3. Экономико-математические методы и модели: Учеб. пособие / Н.И. Холод, А.В. Кузнецов, Я.Н. Жихар и др.; Под общ. Ред. А.В. Кузнецова. 2-е изд. – Мн.: БГЭУ, 2000. – 412 с.

Метод графов в теории надежности и практике технического сервиса

д.т.н. проф. Олейник А.В., д.т.н. проф. Лукашев Е.А., д.т.н. проф. Посеренин С.П., д.т.н. проф. Ставровский М.Е.

Минтранс России, ГОУ ВПО РГУТиС, НП Уником-сервис
stavrov@list.ru

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования метода графов в решении задач теории надежности применительно к практике технического сервиса.

Ключевые слова: теория надежности, метод графов, практика технического сервиса.

Теория надежности включает два основных блока, которые условно можно назвать

«физический» и «математический». В первом блоке теории надежности рассматриваются причины отказов объектов, в большей степени связанные с физико-химическими и механическими процессами старения, изнашивания, разрушения материалов и т.п. Эти процессы обусловлены особенностями конструкции, технологии производства и режимов эксплуатации изделия. Повышение надежности изделия с этой точки зрения может достигаться путем внесения изменений в конструкцию изделия, подбором материалов, в меньшей степени поддающихся изнашиванию, коррозии и т.п. в условиях эксплуатации.

Задачи математической теории надежности заключаются в разработке методов оценки и анализа тех же причин, которые в общей формулировке могут быть названы причинами отказов. Эти методы позволяют, например, методами статистики установить «слабые места» изделия, т.е. выделить те элементы системы, которые чаще всего приводят к ее отказу в целом. Для конструкторов, технологов производящих и эксплуатирующих предприятий такая информация является постановкой задачи для внесения изменений в конструкцию и технологию. В то же время для планирующих подразделений информация о том, что определенная деталь, узел, агрегат и т.п. наиболее часто выходят из строя, позволяет оценить, например, необходимый объем запасных частей для обеспечения работоспособности изделия в целом.

Таким образом два этих блока дополняют друг друга и при согласованном обмене информацией могут обеспечить разработку обоснованных рекомендаций по повышению надежности (качества) изделия. Однако эти два блока имеют концептуальные различия. Физическая составляющая рассматривает отказ как следствие, наступившее в результате действия ряда причин, т.е. под отказом понимается детерминированный процесс, математическая составляющая рассматривает отказ как случайное событие, а поток отказов – как случайный процесс.

В теории надежности существует еще одна проблема, объединяющая два этих блока. Это – математическое моделирование физических процессов, являющихся причиной отказов. Рассматривая тенденции развития исследований в области надежности и анализируя опыт США, Кубарев А.И. [1] выделяет три этапа. Первый этап – «карандашно-бумажный», результатом которого было развитие теории, основанной на применении экспоненциального закона для оценки надежности. На этом этапе надежность рассматривалась как внутренне свойство элементов в отрыве от систематических причин, вызывающих появление отказов. Второй этап – развитие работ по экспериментальной оценке надежности. Основным результатом этого этапа стал пересмотр концепции о «неизбежности» и «случайности» отказов. Для «случайных» отказов были выявлены причины, их вызывающие, и которые определялись конструкцией изделий. Третий этап Кубарев А.И. описывает следующим образом - еще сохранился ряд традиций предыдущих этапов: дальнейшая разработка вопросов, связанных с экспоненциальным законом, «наличие тщательно отработанных статистических и технических публикаций на неоправданных допущениях с целью оправдать применение экспоненциального закона». В подтверждение автор приводит цитату: «15 или 20 лет назад мы начали с того, что имело вид разумной теории. И мы потратили 15 лет на разработку объяснений, почему эта «разумная» теория не объясняет того, что имеет место в действительности. Нельзя исказить действительность, чтобы подвести ее под законы плохой теории. Развитие традиций – один из способов приведения в систему накопленного опыта. Однако слепое следование традициям может направить нас по неправильному пути».

Приведение в систему накопленного опыта можно считать, по нашему мнению, руководством в деле дальнейшего развития теории надежности. В основу такого развития должны быть положены следующие предпосылки:

- большинство отказов, которые появляются при эксплуатации изделий, можно предвидеть заранее, поэтому их нельзя считать случайными;
- большинство внезапных отказов объясняются недоработками и ошибками конструирования, изготовления, сборки, поэтому необходимо не констатировать факты появления вне-

запных отказов, а разрабатывать способы, исключаящие их возможность;

- большинство методов контроля в действительности не позволяет обнаружить дефекты; нужны новые методы, дающие возможность прогнозировать отказы с целью своевременного принятия необходимых мер, исключаящих их внезапный характер [2];
- надежность технических систем должна оцениваться еще на стадии проектирования;
- управление надежностью должно носить комплексный характер и обеспечиваться на этапах проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта.

В связи с такой постановкой вопроса следует обобщить опыт применения графов в теории надежности. Эта попытка обобщения преследует цель проследить формализм формулировки инженерных задач и оценить приемлемость получаемых результатов для практического использования. Кроме того, преследуется цель развития подхода для решения более сложных задач, встречающихся в инженерной практике для которых необходима разработка соответствующего математического аппарата.

Под надежностью технологических систем по параметрам производительности понимается их свойство обеспечивать и сохранять ритм выпуска продукции. Для моделирования такой системы используется граф («граф Эрланга»), представленный на рисунке 1.

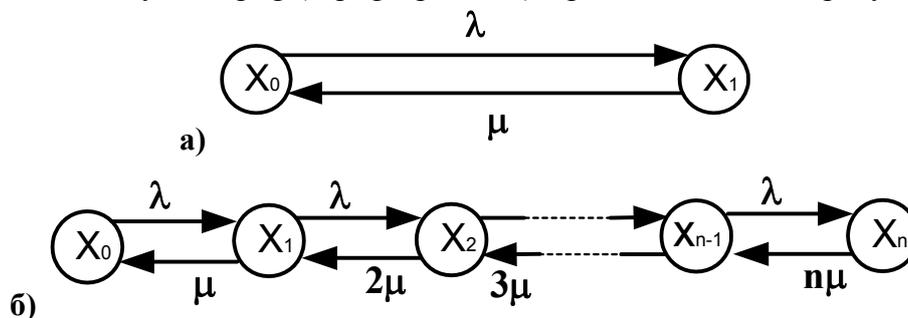


Рисунок 1 – Граф состояний одноканальной (а) и многоканальной (б) системы с отказами

По этому графу составляется система дифференциальных уравнений для вероятностей нахождения системы в одном из состояний, определяемых графом и интенсивностями переходов между состояниями.

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \quad (1a)$$

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda + k\mu) P_k(t) + \lambda P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + (k + 1)\mu P_{k+1}(t); \quad (1б)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -n\mu P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t); \quad (1в)$$

Здесь λ - интенсивность потока заявок, μ - интенсивность потока обслуживаний (величина, обратная среднему времени выполнения одной заявки). Система уравнений (1) дополняется условием

$$\sum_{k=0}^{k=n} P_k = 1. \quad (2)$$

В стационарном состоянии $\frac{dP_k(t)}{dt} = 0$ и система становится системой алгебраических уравнений, что позволяет рассчитать вероятности P_k , среднее число требований в системе и очереди, среднее число незанятых единиц обслуживания, среднее время ожидания в

очереди.

Для оценки надежности технологических систем с учетом отказов из-за внешних и внутренних причин используется граф, представленный на рисунке 2, где для состояний системы приняты следующие обозначения 0 - состояние работоспособности, 1 - состояние отказа по внутренним причинам, 2 - состояние отказа по внешним причинам, 12 - система находится в состоянии неработоспособности по внутренним причинам и в то же время проявляются внешние причины отказов. Состояние 21 не реализуется, так как предполагается, что если система находится в состоянии отказа по внешним причинам, то она не функционирует и не может быть реализован отказ по внутренним причинам.

Данный граф дает систему уравнений типа (1), включающую 4 уравнения, число которых равно числу состояний системы, и условие (2).

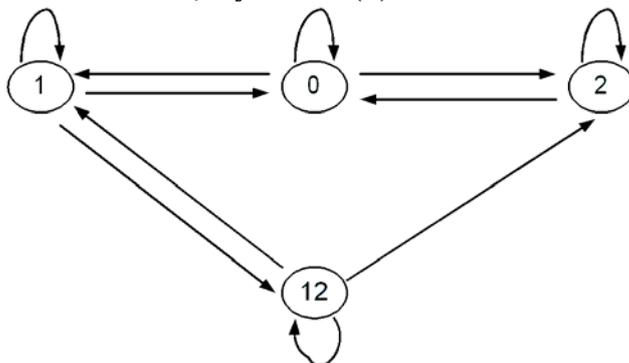


Рисунок 2 – Граф состояний технологической системы, отказы которой происходят по внешним и внутренним причинам

Построение графов используется для формулировки стратегий технического обслуживания, в которых предусматривается полное восстановление системы [3, 4]. При одном виде восстановления (стратегия А), когда восстановление системы проводится только после самостоятельного проявления отказа, задача формализуется в виде графа состояний, представленного на рисунке 3.

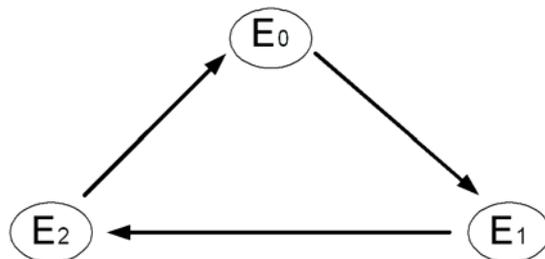


Рисунок 3 – Граф состояний для стратегии А

Здесь случайный процесс $x(t)$, характеризующий состояние системы в произвольный момент времени t , принимает три значения:

$$x(t) = (E_0, E_1, E_2); \quad (3)$$

Здесь состояние E_0 означает, что система в момент времени t работает; E_1 - система в момент времени t простаивает в неработоспособном состоянии (скрытый отказ); E_2 - система в момент времени t находится в ремонте.

В случае двух видов восстановления и мгновенной индикации отказа (стратегия В), когда полное восстановление системы проводится либо в момент отказа, либо в заранее назначенный календарный момент времени, задача формализуется в виде графа состояний, представленного на рисунке 4. Случайный процесс $x(t)$ принимает три значения:

$$x(t) = (E_0, E_1, E_2); \quad (4)$$

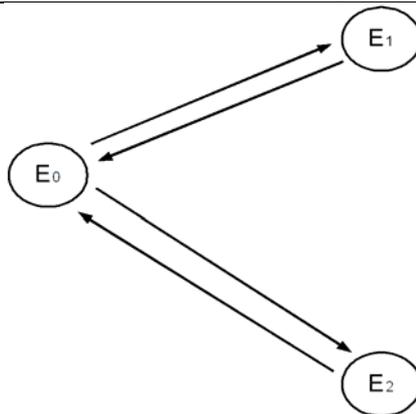


Рисунок 4 – Граф состояний для стратегии В

Здесь состояние E_0 означает, что система в момент времени t работает; E_1 - система в момент времени t простаивает и производится внеплановый аварийно-профилактический ремонт; E_2 - система в момент времени t находится в состоянии плановой профилактики.

В случае стратегии хранения (стратегия С), когда полное восстановление системы проводится только в заранее назначенные календарные моменты времени независимо от отказов системы, задача формализуется в виде графа состояний, представленного на рисунке 5.

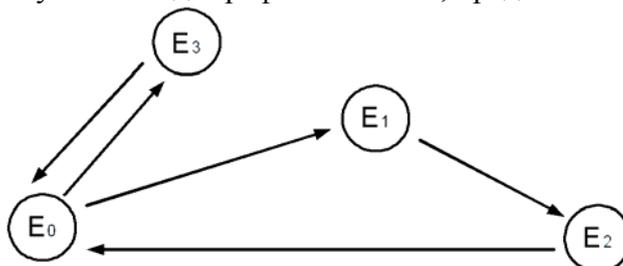


Рисунок 5 – Граф состояний для стратегии С

Здесь случайный процесс $x(t)$, характеризующий состояние системы в произвольный момент времени t , принимает четыре значения:

$$x(t) = (E_0, E_1, E_2, E_3); \tag{5}$$

Здесь в момент времени t состояние E_0 означает, что система работает; E_1 - система в неработоспособном состоянии (скрытый отказ); E_2 - производится плановый аварийно-профилактический ремонт; E_3 - система находится в состоянии плановой предупредительной профилактики.

В общем случае (стратегия D), когда полное восстановление системы проводится либо в момент самостоятельного проявления отказа, либо в заранее назначенный календарный момент времени, задача формализуется в виде графа, представленного на рисунке 6.

Здесь случайный процесс $x(t)$, характеризующий состояние системы в произвольный момент времени t , принимает пять значений:

$$x(t) = (E_0, E_1, E_2, E_3, E_4) \tag{6}$$

Здесь в момент времени t состояние E_0 означает, что система работает; E_1 - система простаивает в неработоспособном состоянии (скрытый отказ); E_2 - производится внеплановый аварийно-профилактический ремонт; E_3 - производится плановый аварийно-профилактический ремонт; E_4 - система находится в состоянии плановой предупредительной профилактики.

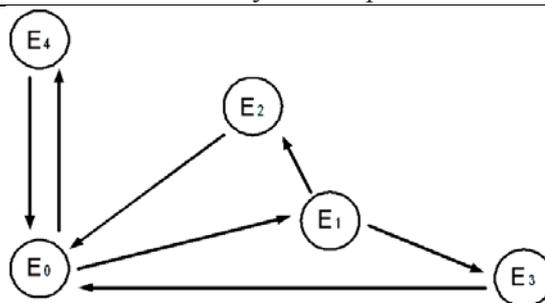


Рисунок 6 – Граф состояний для стратегии D

Существуют и другие типы стратегий [5, 6], например, для обслуживания нескольких последовательно соединенных подсистем. Восстановление отказавших блоков системы может соответствовать стратегии E , когда в системе после самостоятельного проявления отказа проводится замена только отказавшего блока (элемента). При восстановлении отказавших блоков и профилактике всей системы – стратегия F – в системе проводится полное обновление, когда наработка достигает заданной величины, а при отказе проводится замена только отказавшего блока.

Здесь в момент времени t $x(t) = (E_0, E_1, E_2)$: E_0 - система работоспособна; E_1 - в системе проводится внеплановый аварийно-профилактический ремонт части системы; E_2 - в системе проводится внеплановая предупредительная профилактика. При реализации стратегии G в системе проводится полное обновление, если появился отказ или суммарная наработка достигла заданной величины. Сравнение стратегий путем сопоставления значений одноименных показателей функционирования позволяет выбрать наиболее предпочтительную стратегию, для чего необходимо установить критерий выбора.

Для формализации процесса организации профилактики систем с избыточностью на основании информации в моменты контроля используется граф [7] (рисунок 7).

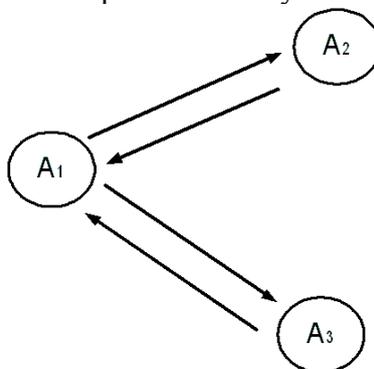


Рисунок 7 – Граф состояний на периоде регенерации (восстановление и обновление системы)

В этом случае рассматривается система с избыточностью, состоящая из N элементов и работающая непрерывно. Для таких систем характерно, что отказ одного или нескольких элементов не приводит к общему отказу системы. Задача, которая формализуется с помощью графа состояний, заключается в выборе стратегии обслуживания, т.е. в определении разбиения множества состояний A на непересекающиеся множества A_1 , A_2 и A_3 . Множества A_1 , A_2 и A_3 соответствуют следующим ситуациям: попадание вектора параметров контроля в A_1 означает продолжение наблюдений, в A_2 - проведение профилактики, в A_3 - проведение аварийно-профилактического ремонта. Критерием разбиения исходного множества могут служить, например, средние удельные затраты, приходящиеся на единицу времени безотказной работы.

Дублированная система без восстановления с идеальным переключающим устройством может быть представлена в виде графа на рисунке 8. Принимается, что в момент времени $t = 0$ оба элемента дублированной системы x_1 и x_2 работоспособны и функционируют (начальное состояние z_1). Интенсивности отказов элементов x_1 и x_2 равны соответственно λ_1 и λ_2 . При отказе одного из элементов система с дублированием переходит в состояние z_2 или z_3 . С отказом одного элемента может измениться интенсивность отказов другого элемента ($\lambda_1 \rightarrow \lambda_{1(2)}$; $\lambda_2 \rightarrow \lambda_{2(1)}$), например, по причине изменения электрических или механических нагрузок. После отказа обоих элементов система теряет работоспособность (состояние z_4).

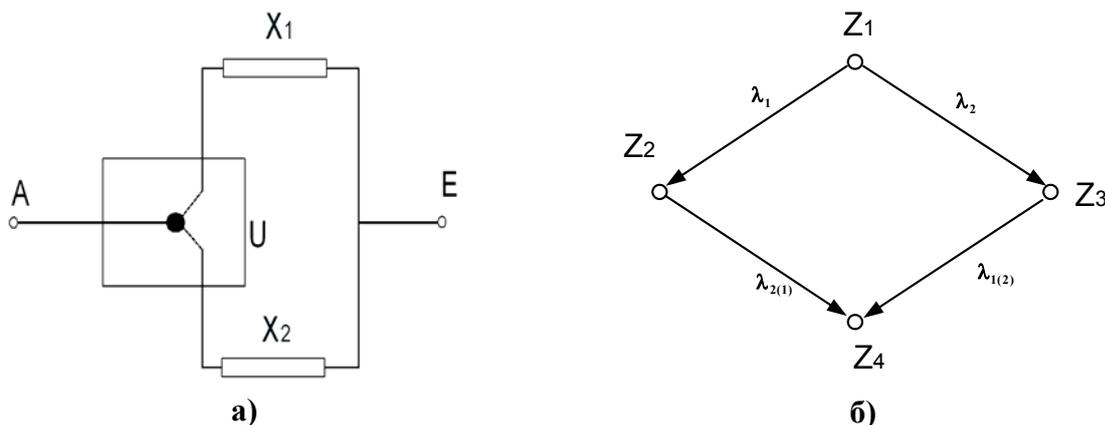


Рисунок 8 – Граф состояний (б) дублированной системы без восстановления с идеальным переключающим устройством (а)

Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_{2(1)} & 0 & 0 \\ \lambda_2 & 0 & -\lambda_{1(2)} & 0 \\ 0 & \lambda_{2(1)} & \lambda_{1(2)} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

Интегрирование системы (7) дает следующие решения:

$$p_1(t) = \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2)t\}; \quad (8a)$$

$$p_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_{2(1)}} \left(\exp\{-\lambda_{2(1)}t\} - \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2)t\} \right); \quad (8б)$$

$$p_3(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_{1(2)}} \left(\exp\{-\lambda_{1(2)}t\} - \exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2)t\} \right); \quad (8в)$$

$$p_4(t) = 1 - (p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)). \quad (8г)$$

Вероятность безотказной работы дублированной системы $R_S(t)$ составляет:

$$R_S(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t). \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет рассчитать все другие характеристики надежности – математическое ожидание и моменты более высоких порядков. Случайная длительность наработки T (до момента первого отказа) определяется функцией распределения:

$$F_T(t) = P(T \leq t) \quad (10)$$

или дополнительной функцией, задающей вероятность безотказной работы,

$$R_T(t) = P(T > t) = 1 - F_T(t). \quad (11)$$

В большинстве случаев под T понимается непрерывная случайная величина, для которой существует плотность распределения:

$$f_T(t) = \frac{d}{dt} F_T(t). \quad (12)$$

Если наработка T зависит только от числа циклов включения, тогда она является дискретной случайной величиной.

Функция распределения $F_T(t)$, дополнительная функция $R_T(t)$ и плотность распределения вероятностей $f_T(t)$ - каждая в отдельности однозначно определяет распределение вероятностей непрерывной случайной величины. Интенсивность отказов в интервале времени $(t, t + dt)$ для изделий, не отказавших до момента времени t , определится выражением:

$$\lambda_T(t) dt = \frac{F_T(t + dt) - F_T(t)}{1 - F_T(t)} = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)} dt \quad (13a)$$

$$\text{или } \lambda_T(t) = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)}. \quad (13b)$$

Ожидаемая остаточная наработка $r_T(t)$ для состояния изделия, которое не имело отказов до момента времени t , составит [8]

$$r_T(t) = \frac{1}{1 - F_T(t)} \int_t^{\infty} (\tau - t) f_T(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Эти пять функций – показателей надежности (F , R , f , λ , r), полностью характеризуют распределение отказов, так как знание одной из них позволяет определить другую. Интенсивность отказов $\lambda_T(t)$ определяет различия между распределениями наработок, например, теоретических – Вейбулла, логарифмически-нормального и гамма-распределения. Этот показатель надежности (из вышеназванных пяти) является наиболее «чувствительным» к особенностям процесса, который сопровождается отказом элементов системы.

В случае дублированной системы с восстановлением и идеальным переключающим устройством граф состояний имеет вид, представленный на рисунке 9. Здесь состояние z_1 - элементы x_1 и x_2 работоспособны; состояния z_2 и z_3 - отказавшие элементы; x_1 и x_2 - находятся в ожидании ремонта; состояния z_4 и z_5 - элементы x_1 и x_2 , соответственно, находятся в состоянии ремонта; z_6 - состояние отказа обоих элементов x_1 и x_2 .

Если оба элемента x_1 и x_2 идентичны (имеют одинаковые интенсивности отказов, поступления на ремонт и восстановления в ходе ремонта), а резервный элемент находится в режиме «холодного» резерва, то граф состояний, представленный на рис. 9, может быть упрощен (рисунке 10). При «горячем» резерве интенсивность перехода λ из состояния z_1 в состояние z_2 заменяется на 2λ . Здесь состояние z_1 - элементы x_1 и x_2 работоспособны; состояние z_2 - один из элементов отказал и ожидает ремонта, другой находится в работоспособном состоянии; состояние z_3 - один из элементов ремонтируется, другой находится в работоспособном состоянии; состояние z_4 - оба элемента отказали. Переход системы в состояние z_4 из состояний z_2 и z_3 означает, что один работоспособный элемент может отказать,

когда другой находится в состоянии ремонта (z_3) или его ожидания (z_2).

В случае реального переключающего устройства, которое не имеет абсолютной надежности и может отказаться, т.е. включение резервного элемента с вероятностью p не будет выполнено, отсутствие такого переключения приводит к отказу всей системы.

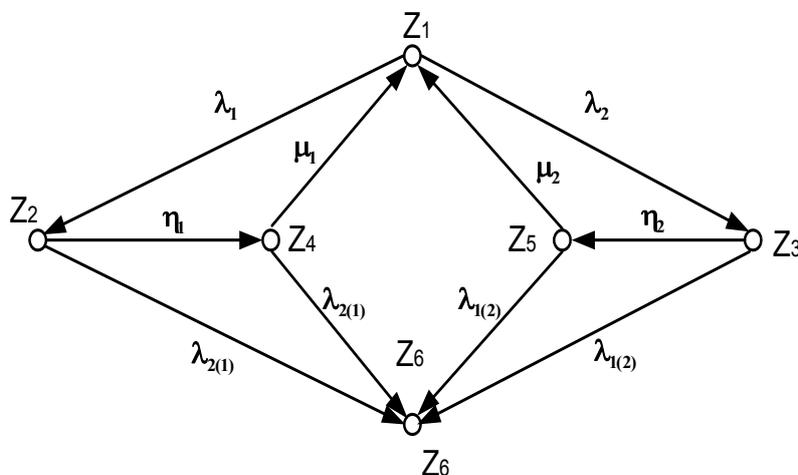


Рисунок 9 – Граф состояний дублированной системы с восстановлением и идеальным переключающим устройством (η_i - интенсивность поступления на ремонт из состояния ожидания ремонта)

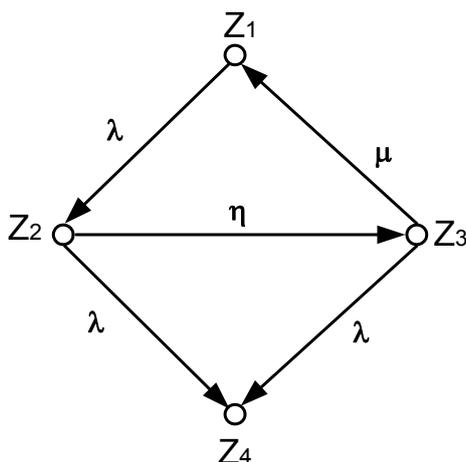


Рисунок 10 – Граф состояний дублированной системы с идентичными элементами и идеальным переключающим устройством

При анализе различных технических систем предполагается, что они состоят из конечного числа элементов. При этом под элементом понимается некоторая часть системы, более детальное рассмотрение которой, нецелесообразно в рамках конкретных условий. Степень детализации определяется многими факторами, а понятие «элемент» определяется целью исследования. Под элементом может пониматься функционально автономная часть системы (блок). При определении необходимого объема запасных частей элемент удобнее определять как конструктивно законченную сборочную единицу (модуль, блок, сборку).

Если система состоит из n элементов, каждый из которых может находиться в двух состояниях- в работоспособном и в состоянии отказа, то эта система имеет 2^n состояний. С точки зрения теории надежности процесс функционирования системы есть траектория перехода из одного состояния в другое. Если текущее состояние i -того элемента в момент времени t есть $x_i(t)$, тогда текущее состояние системы будет

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}. \quad (15)$$

Все множество 2^n состояний можно разбить на два подмножества: G - состояние работоспособности системы ($X(t)=1$) и \bar{G} - состояние отказа системы ($X(t)=0$). Разбиение всего множества состояний системы на подмножества G и \bar{G} определяется критерием отказа системы, который, в свою очередь, определяется структурой системы, ее назначением, требованиями к качеству функционирования. Так, например, при последовательном соединении элементов системы $X(t)=1$, когда все элементы системы находятся в работоспособном состоянии ($x_i(t)=1$), если хотя бы один из элементов отказал ($x_i(t)=0$), тогда $X(t)=0$. При параллельном соединении элементов системы $X(t)=1$, если хотя бы один из элементов находится в работоспособном состоянии ($x_i(t)=1$), тогда как все остальные $n-1$ элементов могут находиться в состоянии отказа ($x_j(t)=0, j \neq i$).

Рассмотрим некоторую периодичность мероприятий технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), которую представим в виде графа, изображенного на рисунке 11.



Рисунок 11 – Граф последовательности мероприятий ТО и Р
(T_i - мероприятия ТО или Р)

Данный граф может определять характер, т.е. совокупность некоторых технологических операций восстановления, и временную последовательность проводимых операций ТО и Р. Этот же граф может представлять не отдельные технологические операции ТО и Р, а в целом процесс периодического восстановления работоспособности обслуживаемой технологической системы после очередного отказа, т.е. каждый узел графа представляет всю совокупность этих операций от момента потери работоспособности до момента ее восстановления. Однако в этом представлении не содержится информации о технологической системе и ее функционировании между мероприятиями ТО и Р, поэтому к данному графу добавим узлы, представляющие нахождение обслуживаемой технологической системы в рабочем процессе. В этом случае граф примет вид, представленный на рисунок 12, где каждый узел T_i может рассматриваться как граф последовательности технологических операций ТО и Р.

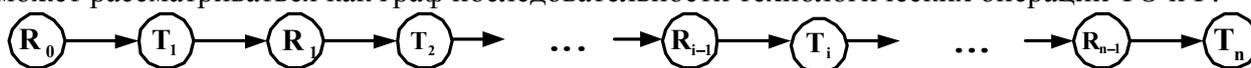


Рисунок 12 – Граф последовательности состояний нахождения обслуживаемой технологической системы в рабочем процессе (R_i) и в процессе восстановления (T_i)

Этот граф может быть упрощен, если ввести допущение о полной идентичности состояний $R_0, \dots, R_{i-1}, \dots, R_{n-1}$ (R), а также $T_1, \dots, T_i, \dots, T_n$ (T), тогда в силу этого допущения данный граф примет вид, представленный на рисунке 13. Этот граф представляет собою альтернирующий процесс и идентичен графу, в форме которого представляют процессы «гибели и размножения» в теории массового обслуживания (в данном случае одноканальной системы). Из преобразований графов становится ясно, что система после восстановления (например, после ремонта) не идентична системе, когда она находится в исходном состоянии (новое изделие).



Рисунок 13 – Граф переходов обслуживаемой технологической системы из состояния работоспособности (целевого функционирования) - R , в состояние восстановления (ТО и Р) - T

Из анализа становится ясно, что допущения, рассмотренные выше и которые положены в основу определения периодичности и объема ТО и Р, должны быть скорректированы, если ставится задача более реалистичного теоретического представления комплекса «обслуживаемая технологическая система – система ТО и Р». Коррекция допущений должна касаться, прежде всего, исключения предположения об идентичности состояний R_i . Однако и в этом случае остается проблема, которая не может быть формализована в терминах теории графов, используемых в теории массового обслуживания. Эта проблема касается представления эволюции (дрейфа) системы к состоянию отказа, что особенно существенно для постепенных отказов (отказов, которые проявляются после накопления критической «концентрации» дефектов – кумулятивных повреждений), характерных для стареющих и изнашивающихся систем.

Объединим в один узел графа состояния $R_{i-1} - T_i$, тогда граф последовательности мероприятий на всем протяжении рабочей части жизненного цикла технологической системы (изделия) примет вид, представленный на рисунке 14. В свою очередь каждый узел этого графа (рисунок 14) есть «почти альтернирующий» процесс (рисунок 12), который в наиболее краткой форме задает «термодинамический» цикл «работа – восстановление». Эти два графа являются основой построения временной диаграммы последовательности «работа – восстановление». Эта процедура перехода от графа альтернирующего процесса к временной диаграмме является фактически процедурой введения переменной времени в дополнение к фазовым переменным, в координатах которых представляют фазовый портрет динамической системы (термодинамический цикл). Таким образом, предлагаемое решение задачи сводится к построению двух графов, рассмотренных выше, и построению временной диаграммы, которая является основой выбора стратегии ТО и Р (в зависимости от принятого критерия).



Рисунок 14 – Граф эволюции технологической системы на протяжении рабочей части жизненного цикла изделия (технологической системы); G_i - узел, представляющий работу и восстановление технологической системы после отказа

Некоторые уточнения задачи могут потребоваться на этапе разработки графа ТО и Р. Например, к графу альтернирующего процесса могут быть добавлены состояния, отвечающие «дрейфу» технологической системы к состоянию отказа, и состояния, отвечающие совокупности операций восстановления и «поднимающие» «термодинамические» параметры обслуживаемой системы до почти исходного состояния. Такой граф представлен на рисунке 15.

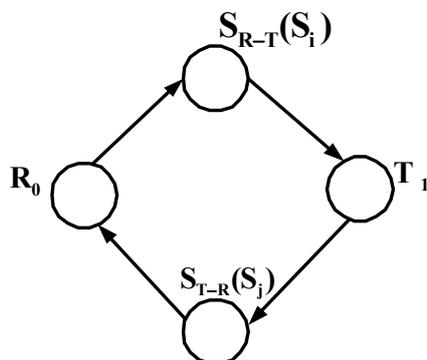


Рисунок 15 – Граф, представляющий «термодинамический цикл» комплекса «технологическая система – система сервиса (ТО и Р)»

В этом графе состояние S_{R-T} - постепенная потеря работоспособности (снижение первоначального ресурса) и приближение к состоянию отказа. Время нахождения в состоянии

S_{R-T} есть время функционирования технологической системы в целевом рабочем процессе. Состояние S_{T-R} - состояние восстановления технологической системы после отказа; здесь также технологическая система находится некоторое время, которое может быть названо временем пребывания (по аналогии с терминологией теории химических реакторов).

Усложнение графа альтернирующего процесса, т.е. переход к графу термодинамического цикла, дает определенные преимущества в смысле приближения теоретического описания к реальным системам. Узел графа термодинамического цикла S_{T-R} представляет не только обслуживаемую технологическую систему (восстанавливающуюся в данном случае), но и систему обслуживающую – систему сервиса (ТО и Р). Поэтому переход от T_1 к R_0 может проходить по разным путям, как в тепловых машинах. Для систем сервиса эти пути могут отражать разное число каналов обслуживания, т.е. состояние S_{T-R} разбивается на некоторое число состояний s_j , одно из которых может быть более предпочтительным, но только в смысле оптимальности комплекса «обслуживаемая технологическая система – система сервиса». Логическая структура данной «оптимальности» достаточно прозрачна: например, увеличение числа ремонтных бригад (каналов обслуживания) для состояний s_j будет приводить к тому, что время на пребывание технологической системы в состоянии восстановления будет затрачиваться меньше. Это, в свою очередь, приведет к снижению потерь в форме недопроизведенной продукции. Однако с увеличением числа ремонтных бригад ситуация станет такой, что часть бригад будет излишней (излишняя избыточность), что и приведет к снижению эффективности (термодинамической, экономической) рассматриваемого комплекса.

Формализация подходов может быть распространена на широкий круг организационных задач. Например, выгодно ли фирме, выпускать дешевую продукцию, которая требует больших затрат на обслуживание? Фирма в этом случае при производстве запасных частей и проведении обслуживания производимой техники будет получать больше прибыли. А потребителю эта стратегия не выгодна, так как в результате простоя техники убытки от недополучения продукции ложатся на его плечи. Стратегии производящей компании и потребителя разные. Потребитель по этой же методике должен оценивать стратегию каждой производящей компании и сравнивать это со своими возможностями: если резерв свободных средств у потребителя достаточен, а простой его технологического процесса дорог, тогда лучшей для него будет дорогая техника и дорогой, но эффективный сервис.

Литература

1. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – М.: Изд. стандартов, 1989. 264 с.
2. Лукашев Е.А., Ставровский М.Е. К построению математических моделей технической диагностики узлов трения// Теоретические и прикладные проблемы сервиса, 2004. - № 1(10). с. 10 – 19.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М., Машиностроение, 1984. 312 с.
4. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
5. Ставровский М.Е., Посеренин С.П., Олейник А.В., Кубарев А.И. Экспертиза и диагностика технических систем. - М., 2004, -354 с.
6. Посеренин С.П. Теоретические основы стратегий технического обслуживания машин и технологического оборудования. Автореферат дисс. на соискание степени докт. техн. наук 2005
7. Ставровский М.Е., Посеренин С.П., Олейник А.В., Кубарев А.И. Экспертиза и диагностика технических систем. - М., 2004, -354 с.
8. Акопов М.Г. Оценка средней наработки до отказа системы с последовательным соединением стареющих элементов // Надежность и контроль качества. 1982. № 4.
9. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. - М.: 1974. - 258 с.