

Научная статья

УДК 303.732.4

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ С ЯЧЕЙСТОЙ СТРУКТУРОЙ

✉ Коваленко Роман Андреевич;

Дагаев Александр Владимирович;

Сорокин Алексей Андреевич.

Ивангородский гуманитарно-технический институт – филиал Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, г. Ивангород, Россия

✉ kovalenko_ra@ifguap.ru

Аннотация. Требования к заданным характеристикам надежности сетей являются одной из перспективных и важных задач, так как от этого зависит стоимость оборудования, срок эксплуатации и стратегии обслуживания сетей. В статье представлен анализ надежности систем передачи данных с ячеистой структурой, показана вариабельность решения поставленной задачи. Представлен вывод уравнений коэффициента готовности системы с одинаковыми элементами в системе, приведены формулы расчета показателей надежности при отказе части элементов системы с различной топологией структуры сети, выведены уравнения нижней и верхней границ коэффициента готовности системы. Представлены результаты моделирования зависимости коэффициента готовности системы от коэффициента готовности элемента, разработана методика оценивания показателей надежности ячеистой структурой с применением имитационного моделирования, дано описание неасимптотической модели функционирования элемента системы с наличием встроенного контроля, приведены результаты имитационного моделирования работы элемента сети.

Ключевые слова: моделирование, система, ячеистая сеть, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы

Для цитирования: Коваленко Р.А., Дагаев А.В., Сорокин А.А. Анализ надежности сетей с ячеистой структурой // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 2. С. 68–81.

Scientific article

RELIABILITY ANALYSIS OF NETWORKS WITH CELLULAR STRUCTURE

✉ Kovalenko Roman A.;

Dagaev Alexander V.;

Sorokin Alexey A.

Ivangorod humanitarian-technical institute – branch of Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation, Ivangorod, Russia

✉ kovalenko_ra@ifguap.ru

Abstract. The requirements for the given characteristics of the reliability of networks are one of the promising and important tasks, since the cost of equipment, the service life and strategies for maintaining networks depend on this. The article presents an analysis of the reliability of data transmission systems with a cellular structure, shows the variability of the solution of the problem. The derivation of the equations of the system availability factor with the same elements in the system is presented, the formulas for calculating the reliability indicators in case of failure of some of the system elements with different network structure topology are given, the equations of the lower and upper limits of the system availability factor are derived. The results of modeling the

dependence of the system availability factor are presented on the readiness factor of the element, a method for evaluating the reliability indicators of a cellular structure using simulation modeling is developed, a description of a non-asymptotic model of the functioning of a system element with built-in control is given, and the results of simulation modeling of the network element are presented.

Keywords: simulation, system, mesh network, availability, probability of failure-free operation

For citation: Kovalenko R.A., Dagaev A.V., Sorokin A.A. Reliability analysis of networks with cellular structure // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 2. P. 68–81.

Введение

Развитие сетевых технологий приводит к внедрению систем передачи данных во все сферы деятельности человека. Встают задачи покрытия больших площадей надёжными сетями, интеллектуализации устройств приема и передачи данных, повышения скорости, качества и спектра передаваемой информации. Большую роль в определении характеристик надёжности играют аналитические и имитационные модели, применение математического аппарата и программирования становится неизбежным фактором успешного проекта. Далее, рассмотрим анализ сетей передачи данных с ячеистой топологией с применением математического аппарата надёжности и методов имитационного моделирования.

Ячеистая структура предназначена для решения широкого круга задач, начиная от анализа погодных условий и контроля за посевами, до перераспределения нагрузки электрической сети в технологиях умного города. Ячеистую сетевую структуру удобно представлять в виде графа или матрицы размерностью $m \times n$. Определение характеристик надёжности зависит от исходной структуры сети и в зависимости от надёжности ее элементов и стратегий их обслуживания может принимать разные значения. Сегодня известен ряд источников, посвященных тематике определения характеристик надёжности систем. Источники [1–16] посвящены изучению характеристик надёжности сетевых структур и компьютерных систем, расчеты для экспоненциального распределения характеристик надёжности, показано кодирование пакетов в каналах связи, расчет надёжности для оборудования Cisco. В статьях используются асимптотические оценки характеристик надёжности, однако оцениванию систем со сложной структурой и неасимптотическим моделям не уделяется должное внимание. Далее, рассмотрим надёжность сетей с различной конфигурацией топологии.

Расчет показателей системы с одинаковыми элементами

При условии одинаковых элементов в графе и параллельного условия передачи данных можно считать, что надёжность элементов в каждой цепочке рассчитывается как последовательная структура (рис. 1).

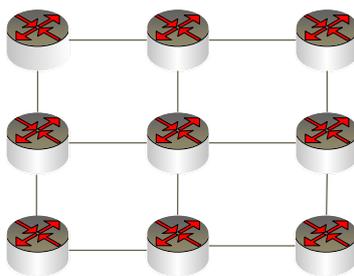


Рис. 1. Ячеистая структура сети

Для невосстанавливаемых и восстанавливаемых систем формула нахождения характеристик надежности будет вычисляться по схожей формуле, используя методику уменьшения размерности исходной задачи. Сначала рассчитаем надежность независимых путей системы в графе, далее, определим надежность параллельных цепочек. Будем использовать методы минимальных путей и минимальных сечений. Путем будет называться любая совокупность элементов, при работоспособности которой система работоспособна.

В рассматриваемом выше примере представим граф в виде матрицы размерностью $n \times m$, где n -количество строк в матрице, m -количество столбцов. В ячейках матрицы расположим одинаковые значения коэффициентов готовности элементов. Далее, при проведении расчетов характеристик надежности будем переходить от графов к матрицам. Таким образом, коэффициент готовности для отдельной цепочки будет иметь следующий вид произведения:

$$K_i = \prod_{j=1}^m K_{г.эл j} = K_{г.эл j}^m, \quad (1)$$

где $K_{г.эл i}$ – это коэффициент готовности i -й цепочки; $K_{г.эл j}$ – коэффициент готовности одного элемента. В данном случае следует учесть что $K_{г.эл j}$ одинаковые для $\forall j \in (1 \dots m)$.

Как видно из формулы (1), значение коэффициента готовности цепочки является коэффициентом готовности отдельного элемента в степени m . Для получения оценки надежности сверху на основе метода минимальных путей сначала нужно найти все минимальные пути системы, далее, элементы каждого минимального пути соединим последовательно, и все полученные цепочки с последовательным соединением элементов соединим параллельно. Затем найдем коэффициент готовности системы, для этого распишем коэффициент готовности для параллельного соединения. Известно, что для параллельного соединения восстанавливаемых элементов определяется сначала коэффициент неготовности элемента или для невосстанавливаемых систем определяется вероятность отказа элемента. Таким образом, коэффициент готовности системы будет вычисляться как отклонение от единицы коэффициента неготовности системы:

$$K_c = 1 - \prod_{i=1}^n K_{нег.i} = 1 - K_{нег.i}^n = 1 - (1 - K_{г.эл j}^m)^n, \quad (2)$$

где $K_{нег.i} = (1 - K_{г.эл j}^m)$ – коэффициент неготовности цепочки; $(1 - K_{г.эл j}^m)^n$ – коэффициент неготовности всех цепочек или системы, где $j \in (1 \dots n)$.

При формировании минимальных сечений осуществляется подбор минимального числа элементов, перевод которых из работоспособного состояния в неработоспособное вызывает отказ системы. При правильном подборе элементов сечения возвращение любого из элементов в работоспособное состояние восстанавливает работоспособное состояние системы. Сечения соединяются последовательно, так как отказ каждого из сечений вызывает отказ системы. Элементы каждого сечения соединяются параллельно, так как для работы системы достаточно наличия работоспособного состояния любого из элементов сечения.

Найдем верхнее значение коэффициента готовности. Для этого находим все минимальные сечения системы. Элементы каждого минимального сечения соединяем параллельно, после чего все минимальные сечения соединяем последовательно. Уравнение коэффициента готовности (K_c) можно записать в следующем виде:

$$K_c = (1 - (1 - K_{г.эл j})^n)^m, \quad (3)$$

где $(1 - K_{г.эл j})$ – коэффициент неготовности j -го элемента.

Рассмотрим пример расчета системы в условиях асимптотической постановки задачи, в которой значение асимптотического коэффициента готовности рассчитывается по формуле (3). Исходными данными являются математические ожидания времени отказа и восстановления.

Пусть математическое ожидание отказа равно 80 000 ч, а время восстановления 300 часов. В этом случае значение асимптотического коэффициента готовности элемента будет равно $K_{Г.эл j} = 0,99626$. Следует отметить, что данное значение будет являться худшей оценкой коэффициента готовности элемента системы. В качестве ячеистой структуры возьмем сеть с размерностью $n=4$ и $m=2$ ячеек. Подставив это значение в уравнение (3), получим:

$$K_c = 1 - (1 - 0,99626^2)^4 = 1 - (3,09E - 9), \quad (4)$$

где коэффициент неготовности отдельной цепочки равен 0,007466.

Значение коэффициента готовности системы при этом будет стремиться к единице, так как коэффициент готовности цепочки будет незначительно снижаться с ростом ее длины, в данном случае с ростом количества ячеек. Рассмотрим нижнее значение коэффициента готовности системы в этом случае. Для этого рассчитаем коэффициент неготовности элемента системы, он будет следующим: $(1 - K_{Г.эл j}) = 0,8789$. Тогда нижнее значение коэффициента готовности будет $K_c = (1 - (1 - 0,99626)^4)^2$.

Из формул следует, что из-за высокого значения коэффициента готовности одного элемента верхнее и нижнее значение коэффициента готовности системы будет очень высоким и стремиться к единице. Рассмотрим систему с низкими показателями надежности. Пусть математическое ожидание отказа $\mu_{отк} = 10^4$ часов и время восстановления $\mu_{восст} = 5 * 10^3$ ч. Даже с таким большим значением времени восстановления асимптотический коэффициент готовности будет равен 0,8. Исходя из этого, подставив значение в формулы (2) и (3), получим значения коэффициентов готовности, равные: 0,648 и 0,99991.

Расчет показателей надежности с учетом отказа части элементов

Рассмотрим формулы, которые можно использовать при отказе части элементов, при условии того, что оставшаяся часть элементов будет передавать информацию, и система будет выполнять свои функции. Допустим, что отказывает половина элементов системы, причем равномерно. После отказа в системе может работать разное количество элементов по горизонтали и по вертикали. В зависимости от того, какое число элементов – четное или нечетное останется, исходная формула может быть преобразована к одной из представленных ниже. В представленных формулах в качестве n и m представлено первоначальное количество узлов по горизонтали и по вертикали в графе, представляющем ячеистую структуру.

$$\text{Четное } n, m: \quad K_c = 1 - (1 - K_{nod j}^{m/2})^{n/2};$$

$$\text{Нечетное } n, m: \quad K_c = 1 - (1 - K_{nod j}^{(m+1)/2})^{(n+1)/2};$$

$$\text{Четное } n, \text{ нечетное } m: \quad K_c = 1 - (1 - K_{nod j}^{(m+1)/2})^{n/2};$$

$$\text{Нечетное } n, \text{ четное } m: \quad K_c = 1 - (1 - K_{nod j}^{m/2})^{(n+1)/2}.$$

Расчет показателей надежности с учетом разных элементов в системе

В данном случае коэффициент готовности нельзя будет записать в сжатой форме, но возможно записать общую формулу для всей системы в следующем виде:

$$K_c = 1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=1}^m K_{nod j_i} \right).$$

Пример анализа характеристик надежности

На рис. 2, 3 и 6 представлены варианты ячеистой сети с минимальным количеством элементов. В расчетах использовались формулы для определения верхней (5) и нижней (6) границ коэффициента готовности системы.

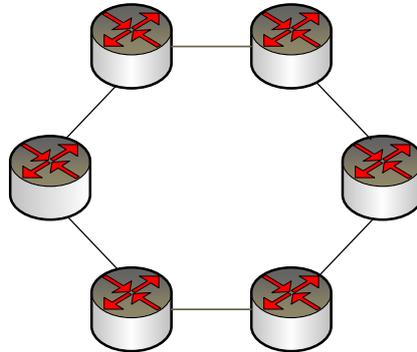


Рис. 2. Шестиугольная структура

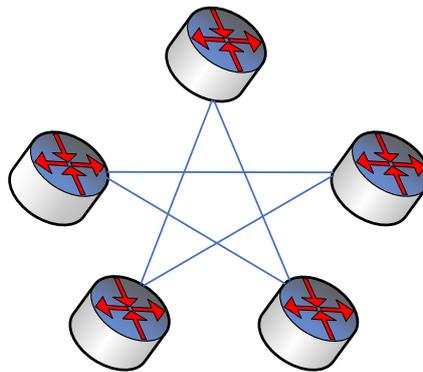


Рис. 3. Структура в виде звезды

Выведены уравнения нижней и верхней границ коэффициента готовности:

$$Kг. \text{ верх. гр.} = Kг. \text{ эл.}^2 (2 - Kг. \text{ эл.}^2); \quad (5)$$

$$Kг. \text{ нижн. гр.} = Kг. \text{ эл.}^2 (2 - Kг. \text{ эл.})^2. \quad (6)$$

На рис. 4, 5, 7 показано поведение границ коэффициента готовности для структуры в случае идентичности элементов системы. Пунктирной линией показано поведение среднего значения коэффициента готовности, который можно считать приближенным к истинному значению. Как видно из графиков 4, 5, верхняя граница коэффициента готовности обусловлена изначальным параллельным соединением вертикальных единичных элементов, полученным сечением схемы и дальнейшим их последовательным соединением. А нижняя граница получена последовательным соединением горизонтальных элементов и их дальнейшим параллельным соединением.

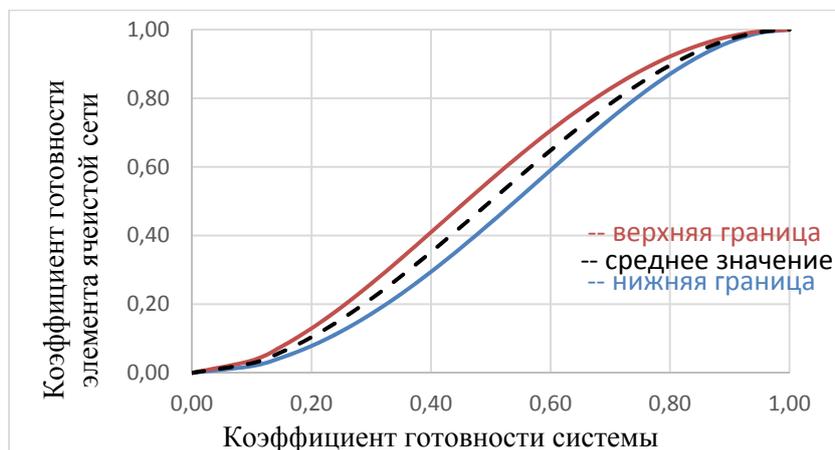


Рис. 4. Зависимость границ шестиугольной структуры

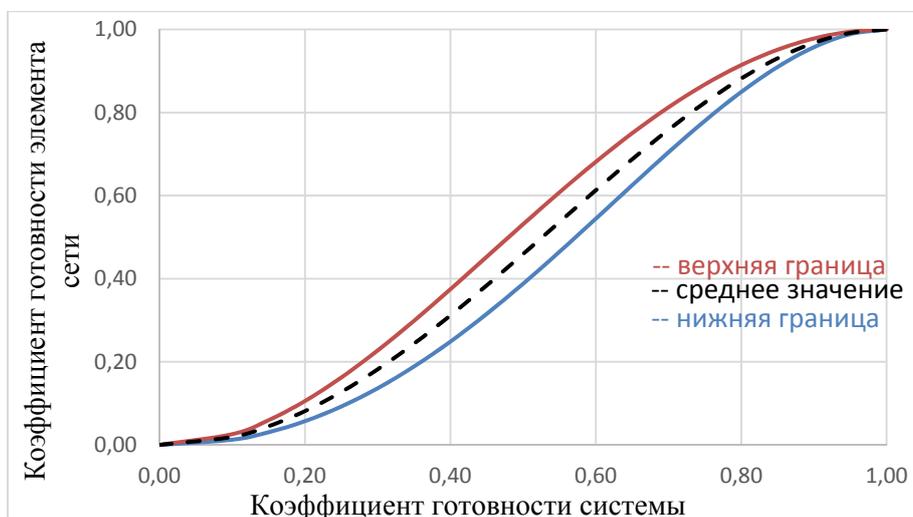


Рис. 5. Зависимость границ структуры звезда

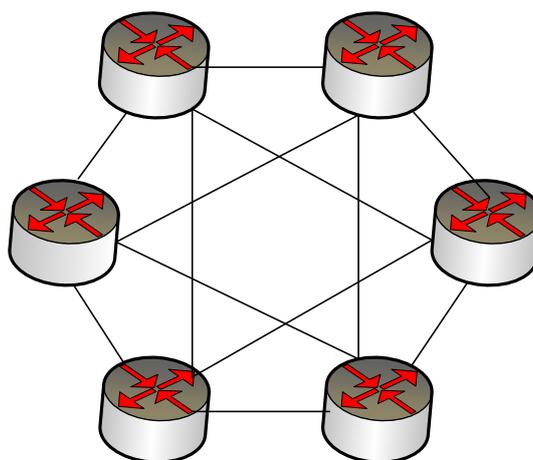


Рис. 6. Структура в виде шестиугольника

Для третьей структуры были получены следующие уравнения границ коэффициента готовности:

$$Kг. \text{ верх. гр.} = Kг. \text{ эл.}^4 * (4 - 4 * Kг. \text{ эл.}^2 + Kг. \text{ эл.}^4);$$

$$Kг. \text{ нижн. гр.} = Kг. \text{ эл.}^4 * (4 - 4 * Kг. \text{ эл.} + Kг. \text{ эл.}^2)^2.$$

На рис. 7 показаны оранжевым цветом и тёмно-синим границы коэффициента готовности и штрих пунктирной линией его средняя оценка.

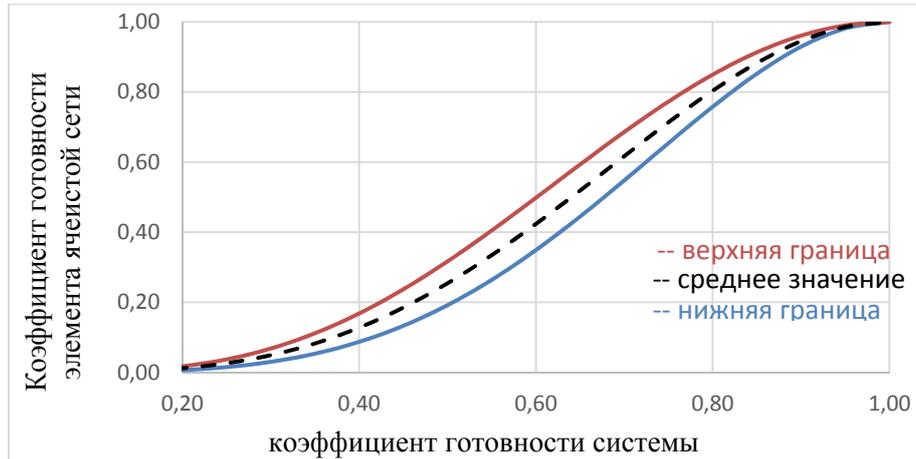


Рис. 7. Зависимость границ структуры шестиугольная звезда

Как видно из графиков, представленных на рис. 7, надежность схемы в среднем выше для третьей схемы, это обусловлено тем, что при сечении в третьей схеме будет четыре параллельных элемента, тогда как в первых двух случаях их только два. Следует отметить, что следует использовать среднее значение коэффициента готовности, так как оно будет давать значения, приближенные к реальности, ввиду того, что отказ горизонтальных и вертикальных элементов равновероятен.

Применение имитационного моделирования для расчета характеристик надежности

Имитационное моделирование позволяет решать любые сложные задачи. В данном случае они касаются моделирования сетевых ячеистых структур. Опишем имитационную модель расчета характеристик надежности. Сначала модель находит все пути в графе (матрице) из начального узла входа в выходной узел. Для поиска пути можно использовать разные динамические методы, например, обход в ширину и в глубину. В последнем случае берем начальную узловую вершину графа и движемся в направлении выходного узла, направо, при этом можем измерять длину пути и двигаться по вектору уменьшения расстояния до выходного узла. Пройденные вершины помечаем, дойдя до выходного узла сохраняем все пути в матрице. Далее, начинаем двигаться в обратном направлении, случайно добавляя новую и еще не пройденную смежную вершину к пути, при этом проверяем идентичность нового пути с сохраненным. Если новой смежной вершины нет, то возвращаемся к той вершине, из которой попали в текущую, и делаем следующую попытку. Если все вершины исчерпаны, то получили полный перечень путей. Первый найденный путь при этом будет кратчайшим. Нахождение всех путей вручную для размерности сетевых структур более пяти элементов представляется невозможным, поэтому применение программных средств и методов обхода является необходимым.

Было разработано приложение, которое определяет все пути, ведущие из узла входа в узел выхода. Используем метод Эзари-Прошана для определения характеристик

надежности. Для расчета характеристик надежности сверху требуется знание только уникальных минимальных путей, но знание всех путей необходимо для определения наименее надежных, так и для определения самых надежных узлов и путей.

После определения путей выполняется определение минимальных путей, требующихся для определения верхней оценки надежности. Далее, выполняется моделирование работы элементов системы с заданной стратегией функционирования. В реализованном варианте учитывается наличие встроенного контроля, как было описано выше. Моделирование случайной величины времени отказа и восстановления выполнялось по нормальному закону с параметрами: $\mu_{\text{отк}} = 8 * 10^4$, $\sigma_{\text{отк}} = 2 * 10^4$, $\mu_{\text{восст}} = 1 * 10^2$, $\sigma_{\text{восст}} = 15$ часов. При генерации случайной величины использовался метод Бокса-Мюллера. Метод удобен тем, что позволяет получить две независимо распределенные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Ниже представлены формулы генерации случайных величин по данному методу:

$$X_1 = R_1 \sqrt{\frac{-2 \ln D}{D}}; X_{20} = R_2 \sqrt{\frac{-2 \ln D}{D}},$$

где X_1 и X_2 – случайные величины, распределенные по нормальному закону; $D=R_1^2 + R_2^2$, где R_1 и R_2 – равномерно распределенные случайные величины на отрезке $(-1, 1)$. Следует отметить, что для представленных случайных величин должно выполняться условие $D \in [0 \dots 1]$. Далее, опишем методику оценки показателей надежности системы с ячеистой структурой.

Применение дискретизации для оценивания показателей надежности системы

Для оценивания показателей надежности систем опишем несложную методику.

Моделирование состояний элементов системы в описанной методике может быть выполнено как по имитационным, так и по аналитическим моделям.

1. Сначала строится структурная схема системы в виде графа или матрицы.
2. Находятся все пути, ведущие из точки входа в точку выхода.
3. Задаются стратегии функционирования элементов.
4. Для моделирования задаются периоды проведения профилактических работ, характеристики законов распределения времени отказа, восстановления, определения места отказа и т.д.

5. Для каждого элемента выполняется моделирование работы со статистикой не менее десяти тысяч раз, что обусловлено требованием к точности моделирования. За расчетную оценку берется среднее значение моделируемой случайной величины. Моделирование выполняется на всем заданном временном интервале. Случайные величины отказа и восстановления сохраняются в матрице состояний элементов, которая содержит времена смены состояний элементов. Количество элементов в данной матрице определяется как отношение времени моделирования к оценке математического ожидания цикла отказа и восстановления умноженное на два.

6. Используя матрицу состояний элементов, создается бинарная матрица (или вектор для каждого) состояния на всем времени моделирования. Бинаризация выполняется для упрощения расчетов характеристик надежности с использованием функций алгебры логики и логических операций. Шаг дискретизации можно принять равным одной минуте, размер бинарной матрицы вычисляется как размер матрицы состояний, умноженный на 60. При переходе от матрицы состояний элементов к матрице бинаризации выполняется проверка состояния элементов, рабочие участки первой матрицы переходят в единичные элементы второй, нерабочие – в нулевые.

7. На следующем шаге для всех путей системы строится матрица путей, каждая строка в которой является аналогичной строке матрицы бинаризации элементов. Количество строк в матрице путей соответствует количеству путей из начальной в конечную точку. При построении матрицы путей для каждого пути определяется цепочка его элементов. Далее, заполняется строка матрицы путей с помощью логической операции «И» над строками бинарной матрицы элементов данного пути. В итоге получается матрица путей, заполненная бинарными состояниями всех путей системы.

8. Выполняется операция логического сложения строк матрицы путей, что соответствует формуле (2) аналитического определения коэффициента готовности при одинаковых элементах системы. После выполнения операции логического сложения на выходе получаем бинарную строку состояния всей системы. Далее, на ее основе происходит расчет неасимптотического коэффициента готовности системы, исходя из его определения. Следует отметить, что неасимптотические характеристики будут стремиться к асимптотическим, при длительной эксплуатации высоконадежной системы. Затем строится график коэффициента готовности системы.

Далее, опишем аналитическую модель надежности элемента системы со встроенным контролем.

Описание модели функционирования элемента системы со встроенным контролем

Рассматриваемая модель работы системы с ячеистой структурой предполагает простую стратегию функционирования ее элементов. Дадим математическое описание стратегии функционирования и представим формулы расчета показателя надежности одного элемента. Так, в системе присутствует наличие встроенного контроля элемента с обнаружением отказа и его полного восстановления. В случае отказа, элемент подвергается ремонту и находится в простое до момента восстановления. Представим подробнее стратегию его функционирования. В начальный момент времени $t_0=0$ элемент начинает работать и коэффициент готовности имеет максимальное значение. Он работает до отказа – ξ_i , далее, выполняется восстановление, которое длится промежуток времени $-\eta_{ifr}$. После восстановления – τ_{ir} элемент продолжает свою работу до очередного момента отказа, далее, происходит восстановление и переход в работоспособное состояние. Такой цикл повторяется до выбранного момента времени t . Представленная стратегия отображена на рис. 8.

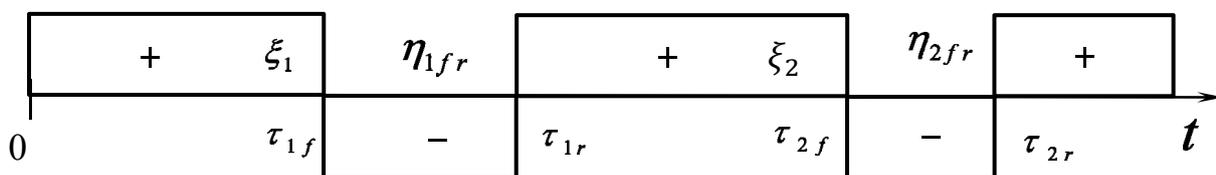


Рис. 8. Стратегия функционирования со встроенным контролем

На рис. 8 плюсами и минусами представлены периоды работы и ремонта системы соответственно; ξ_i – i -я наработка до отказа; η_{ifr} – длительность проведения i -го аварийного восстановления; τ_{if} , τ_{ir} – интервалы времени от начала работы элемента до i -го отказа и i -го восстановления. Данные величины можно записать через ряд других случайных величин:

$$\left\{ \tau_{0,r} = 0; \begin{cases} \tau_{1f} = \xi_1 \\ \tau_{1r} = \xi_1 + \eta_{fr} \end{cases}; \begin{cases} \tau_{2f} = \tau_{1r} + \xi_2 \\ \tau_{2r} = \tau_{1r} + \xi_2 + \eta_{fr} \end{cases}; \begin{cases} \tau_{if} = \tau_{i-1,r} + \xi_i \\ \tau_{ir} = \tau_{i-1,r} + \xi_i + \eta_{fr} \end{cases} \right.$$

Коэффициент готовности (К) представляет собой сумму вероятностей нахождения элемента в работоспособном состоянии:

$$K(t) = \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i-1,r} < t < \tau_{i,f}) = P_1(t < \xi_1) + \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,f}) = (1 - F_{\xi}(t)) + \sum_{i=1}^{\infty} P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,f}).$$

где $P(\tau_{i-1,r} < t < \tau_{i,f})$, $P(\tau_{i,r} < t < \tau_{i+1,f})$ – вероятность попадания величины t на $(i-1)$ и i -й интервал работоспособности; $F_{\xi}(t)$ – функция распределения случайной величины ξ (отказа элемента); $(1 - F_{\xi}(t))$ – вероятность безотказной работы до момента времени t . Выполнив преобразование, получим свертку. Сделав обратное преобразование Лапласа, получим уравнение неасимптотического коэффициента готовности. Таким образом, коэффициент готовности может быть записан в следующем виде:

$$K(t) = [1 - F_{\xi}(t)] + \int_0^t f_{\eta_{fr}}(x) \int_0^{t-x} f_{\xi}(y) K(t-x-y) dy dx \quad (7)$$

где $f_{\eta_{fr}}(x)$ – плотность времени восстановления элемента; $f_{\xi}(y)$ – плотность времени отказа элемента; $K(t)$ – коэффициент готовности элемента.

Уравнение асимптотического коэффициента готовности находится при условии $t \rightarrow \infty$ и может быть выведено из данного уравнения. Асимптотический коэффициент готовности (K_a) является отношением математического ожидания времени отказа $M(\xi)$ к сумме математических ожиданий времени отказа и восстановления – $M(\xi) + M(\eta_{fr})$:

$$K_a = \frac{M(\xi)}{M(\xi) + M(\eta_{fr})}$$

Расчет аналитической формулы (7) возможен с применением численных методов, таких как метод последовательных приближений и конечных сумм. Расчет с применением подобных методов является отдельной задачей. Применение имитационного моделирования упрощает решение поставленной задачи, хотя для получения высокой точности результата требуется дополнительное машинное время. Далее, была разработана имитационная модель по расчету надежности элемента с представленной стратегией обслуживания. Ниже представлены результаты расчета по имитационной модели в виде графика коэффициента готовности элемента при значении параметров отказа $\mu = 90$, $\sigma = 30$ и параметров восстановления $\mu = 19$, $\sigma = 5$. Асимптотическое значение коэффициента готовности элемента составило 0,82.

Следует отметить, что определение коэффициента готовности для системы в данном случае также будет выполняться по формулам, представленным для различной структуры системы, и использовать кривую коэффициента готовности элемента, представленную на рис. 9.

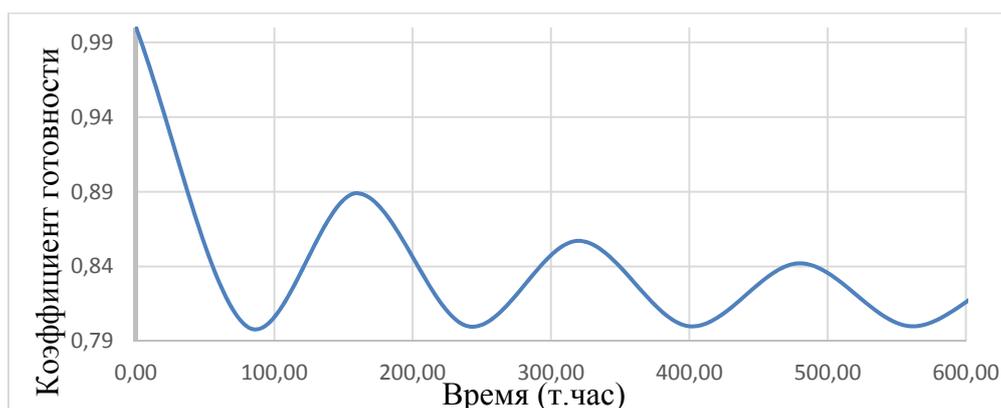


Рис. 9. Неасимптотический коэффициент готовности элемента системы

Заключение

В ходе проведенных исследований был получен ряд результатов, рассмотрим их подробнее. Проведенный анализ функционирования систем с ячеистой структурой показал влияние структуры системы на показатели ее надежности. Были представлены модели системы с ячеистой структурой и выполнены расчеты показателей надежности с применением метода минимальных путей и сечений. В общем случае при подобной структуре следует использовать среднее значение коэффициента готовности. В результате исследований была предложена методика определения коэффициента готовности с применением имитационной модели и дискретизации состояний системы, также аналитическая модель определения коэффициента готовности для однородной сети. В результате работы была определена высокая надежность систем с ячеистой структурой, близкой к единице. Для описания функционирования элемента системы была предложена вероятностная аналитическая модель, которая позволяет определить состояние элемента в любой момент времени.

Следует отметить, что имитационные модели могут применяться для анализа характеристик надежности и других показателей систем любой размерности и сложности. Также они могут применяться при моделировании подсистем опасных и дорогостоящих объектов в различных областях, таких как: аэрокосмическая отрасль, телекоммуникации, энергетика, транспорт, нефтедобывающая промышленность и др.

Список источников

1. Вычисление коэффициентов надежности сети: материалы 42 Юго-Восточной междунар. конф. по комбинаторике, теории графов и вычислениям / И. Бейхл [и др.]. 2011. С. 111–127.
2. Герцбах И., Шпунгин Ю. Надежность сети. Спрингер Сингапур, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-1458-6.
3. Джоши А., Субеда В. Систематизация надежных сетевых топологий с использованием графовых операторов: материалы Междунар. конгресса по информ. и коммуникационным технологиям. 2016. С. 263–270. DOI: 10.1007/978-981-10-0755-2 28.
4. Cisco: доступность сети: сколько вам нужно? Как вы его получите? URL: https://www.cisco.com/web/IT/unified_channels/area_partner/cisco_powered_network/net_availability.pdf (дата обращения: 14.02.2023).
5. Cui L., Dong Q. Последовательный k и родственные модели – обзор // Стохастические модели в области надежности, сетевой и системной безопасности. 2019. С. 3–18. DOI: 10.1007/978-981-15-0864-6 1.
6. Availability factor analysis of a network in mesh structure, Proceedings of 24th International Conference DCCN'2021 (Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications) М.: Изд-во Springer, 2021.

7. Денгиз Б., Алтипармак Ф., Смит А. Эффективная оптимизация отказоустойчивых сетей с использованием эволюционного подхода. *IEEE Transactions on Reliability*. 1997. № 46 (1). DOI: 10.1109/24.589921.

8. Кумар А., Патхак Р., Гупта Ю. Оптимизация надежности на основе генетических алгоритмов для расширения компьютерной сети. *IEEE Transactions on Reliability*. 1995. № 44 (1). С. 63–72. DOI: 10.1109/24.376523.

9. Лю Ю., Чжан Л., Луо Р. Исследования по проектированию архитектуры с высокой надежностью сетевых узлов в системе моделирования десантных боевых действий // Журнал естественных наук Уханьского университета. 2019. № 24 (6). С. 537–548. DOI: 10.1007/s11859-019-1433-3.

10. Надежность для экстренных приложений в Интернете вещей: Междунар. конф. IEEE по распределенным вычислениям в сенсорных системах / Н. Маалель [и др.]. 2013. DOI: 10.1109/dcoss.2013.40.

11. Морино Ю., Мива Х. Проектирование надежной сети с учетом затрат для снижения вероятности отказа при одновременном отказе // Достижения в области интеллектуальных сетей и систем совместной работы Springer International Publishing. 2020. С. 493–502. DOI: 10.1007/978-3-030-57796-4_47.

12. Оценка надежности передачи для беспроводных сенсорных сетей / X. Zhu [et al.] // Международный журнал распределенных сенсорных сетей. 2016. № 12 (2). Р. 1346079. DOI: 10.1155/2016/1346079.

13. Рак Дж., Пикавет М., Йошино Х. Проектирование и моделирование надежных сетей (предисловие) // Телекоммуникационные системы. 2015. № 60 (4). С. 419–421. DOI: 10.1007/s11235-015-9986-8.

14. Родр Игуес-Вела Аскес Дж. А., Камисалис А., Доминго-Феррер Дж. Об индексах надежности сетей связи // Компьютеры и математика с приложениями. 2009. № 58 (7). С. 1433–1440. DOI: 10.1016/j.camwa.2009.07.019.

15. Саттираджу Р., Шоттен Х.Д. Моделирование надежности, анализ и прогнозирование беспроводной мобильной связи // 79-я Конф. IEEE по автомобильным технологиям. 2014. DOI: 10.1109/vtcspring.2014.7023170

16. Шierer Д.Р., Лю Н. Ограничение надежности сетей // Журнал Общества оперативных исследований. 1992. № 43 (5). С. 539–548. DOI: 10.1057/jors.1992.79.

References

1. Vychislenie koefficientov nadezhnosti seti: materialy 42 Yugo-Vostochnoj mezhdunar. konf. po kombinatorike, teorii grafov i vychisleniyam / I. Bejhl [i dr.]. 2011. S. 111–127.

2. Gercbah I., Shpungin Yu. Nadezhnost' seti. Springer Singapur, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-1458-6.

3. Dzhoshi A., Subeda V. Sistematizaciya nadezhnyh setevyh topologij s ispol'zovaniem grafovyyh operatorov: materialy Mezhdunar. kongressa po inform. i kommunikacionnym tekhnologiyam. 2016. S. 263–270. DOI: 10.1007/978-981-10-0755-2_28.

4. Cisco: dostupnost' seti: skol'ko vam nuzhno? Kak vy ego poluchite? URL: https://www.cisco.com/web/IT/unified_channels/area_partner/cisco_powered_network/net_availability.pdf (data obrashcheniya: 14.02.2023).

5. Cui L., Dong Q. Posledovatel'nyj k i rodstvennye modeli – obzor // Stohasticheskie modeli v oblasti nadezhnosti, setevoj i sistemnoj bezopasnosti. 2019. S. 3–18. DOI: 10.1007/978-981-15-0864-6_1.

6. Availability factor analysis of a network in mesh structure, Proceedings of 24th International Conference DCCN'2021 (Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications) M.: Izd-vo Springer, 2021.

7. Dengiz B., Altiparmak F., Smit A. Effektivnaya optimizatsiya otkazoustojchivyyh setej s ispol'zovaniem evolyucionnogo podhoda. IEEE Transactions on Reliability. 1997. № 46 (1). DOI: 10.1109/24.589921.
8. Kumar A., Pathak R., Gupta Yu. Optimizatsiya nadezhnosti na osnove geneticheskikh algoritmov dlya rasshireniya komp'yuternoy seti. IEEE Transactions on Reliability. 1995. № 44 (1). S. 63–72. DOI: 10.1109/24.376523.
9. Lyu Yu., Chzhan L., Luo R. Issledovaniya po proektirovaniyu arhitektury s vysokoy nadezhnost'yu setevykh uzlov v sisteme modelirovaniya desantnykh boevykh dejstvij // Zhurnal estestvennykh nauk Uhan'skogo universiteta. 2019. № 24 (6). S. 537–548. DOI: 10.1007/s11859-019-1433-3.
10. Nadezhnost' dlya ekstremnykh prilozhenij v Internetе veshchej: Mezhdunar. konf. IEEE po raspredelennym vychisleniyam v sensorykh sistemah / N. Maalel' [i dr.]. 2013. DOI: 10.1109/dcoss.2013.40.
11. Morino Yu., Miva H. Proektirovanie nadezhnoy seti s uchetom zatrat dlya snizheniya veroyatnosti otkaza pri odnovremennom otkaze // Dostizheniya v oblasti intellektual'nykh setej i sistem sovmestnoy raboty Springer International Publishing. 2020. S. 493–502. DOI: 10.1007/978-3-030-57796-4_47.
12. Ocenka nadezhnosti peredachi dlya besprovodnykh sensorykh setej / X. Zhu [et al.] // Mezhdunarodnyj zhurnal raspredelennykh sensorykh setej. 2016. № 12 (2). P. 1346079. DOI: 10.1155/2016/1346079.
13. Rak Dzh., Pikavet M., Joshino H. Proektirovanie i modelirovanie nadezhnykh setej (predislovie) // Telekommunikacionnye sistemy. 2015. № 60 (4). S. 419–421. DOI: 10.1007/s11235-015-9986-8.
14. Rodr Igues-Vela Askes Dzh. A., Kamisalis A., Domingo-Ferrer Dzh. Ob indeksah nadezhnosti setej svyazi // Komp'yutery i matematika s prilozheniyami. 2009. № 58 (7). S. 1433–1440. DOI: 10.1016/j.camwa.2009.07.019.
15. Sattiradzhu R., Shotten H.D. Modelirovanie nadezhnosti, analiz i prognozirovaniye besprovodnoy mobil'noy svyazi // 79-ya Konf. IEEE po avtomobil'nym tekhnologiyam. 2014. DOI: 10.1109/vtcspring.2014.7023170
16. Shier D.R., Lyu N. Ogranichenie nadezhnosti setej // Zhurnal Obshchestva operativnykh issledovaniy. 1992. № 43 (5). S. 539–548. DOI: 10.1057/jors.1992.79.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 16.04.2023; одобрена после рецензирования: 16.05.2023;
принята к публикации: 20.05.2023

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 16.04.2023; approved after review: 16.05.2023;
accepted for publication: 20.05.2023

Сведения об авторах:

Коваленко Роман Андреевич, аспирант Российского университета дружбы народов, старший преподаватель кафедры прикладной математики, информатики и информационных таможенных технологий Ивангородского гуманитарно-технического института – филиала Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (188491, г. Ивангород, ул. Котовского, д. 1), e-mail: kovalenko_ra@ifguap.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7904-0176>

Дагаев Александр Владимирович, доцент кафедры прикладной математики, информатики и информационных таможенных технологий Ивангородского гуманитарно-технического института – филиала Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (188491, г. Ивангород, ул. Котовского, д. 1), кандидат технических наук, e-mail: adagaev@list.ru

Сорокин Алексей Андреевич, старший преподаватель кафедры прикладной математики, информатики и информационных таможенных технологий Ивангородского гуманитарно-технического института – филиала Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (188491, г. Ивангород, ул. Котовского, д. 1), e-mail: a.a.sorokin@ifguap.ru

Information about authors:

Kovalenko Roman A., post-graduate student of the Peoples' friendship university of Russia, senior lecturer of the department of applied mathematics, informatics and information customs technologies of the Ivangorod humanitarian and technical institute – branch of Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (188491, Ivangorod, Kotovskogo st., 1), e-mail: kovalenko_ra@ifguap.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7904-0176>

Dagaev Alexander V., associate professor of the department of applied mathematics, informatics and information customs technologies of the Ivangorod humanitarian and technical institute – branch of Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (188491, Ivangorod, Kotovskogo st., 1), candidate of technical sciences, e-mail: adagaev@list.ru

Sorokin Aleksey A., senior lecturer of the department of applied mathematics, informatics and information customs technologies of the Ivangorod humanitarian and technical institute – branch of Saint-Petersburg state university of aerospace instrumentation (188491, Ivangorod, Kotovskogo st., 1), e-mail: a.a.sorokin@ifguap.ru