

УДК 681.516.77

АНАЛИЗ СЕТИ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

О. Г. Шерстнева, к.т.н., доцент, доцент кафедры АЭС СибГУТИ, Новосибирск, Россия;
orcid.org/0000-0003-3156-459X, e-mail: sherstneva@ngs.ru

А. А. Шерстнева, к.т.н., доцент кафедры АЭС СибГУТИ, Новосибирск, Россия;
orcid.org/0000-0002-5849-3536, e-mail: asherstneva@sibguti.ru

Рассматривается задача влияния показателей надежности на значение величины максимального информационного потока в сетях связи. Целью работы является решение задачи определения минимального сечения между любой парой коммутационных узлов сети связи и расчет показателей надежности используемых линий связи. Сеть связи представлена в виде графа. Для решения задачи используются графический и матричный методы расчета. Для определения показателей надежности составлен граф состояний линий связи, выведены формулы для расчета коэффициента готовности и среднего времени нахождения линии связи в неработоспособном состоянии с необнаруженным отказом. По расчетным формулам с помощью программы имитационного моделирования построены графики зависимости основных показателей надежности от интенсивности поступающей нагрузки, интенсивности отказов и интенсивности восстановления линии связи.

Ключевые слова: инфокоммуникационные сети, сечение, информационный поток, матрица, граф состояний, надежность, сеть связи, программа, моделирование.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-52-58

Введение

Инфокоммуникационные системы представляют собой сложные технические объекты, взаимосвязь между которыми описывается совокупностью переменных. Каждая переменная отражает какое-либо событие, происходящее в системе в процессе ее эксплуатации. Например, интенсивность поступления вызовов, интенсивность отказов отдельных сетевых элементов, интенсивность проведения технического контроля и многие другие. Для анализа и прогнозирования поведения инфокоммуникационной системы при изменении условий ее эксплуатации (перегрузка, масштабирование) составляется математическая модель, в которой выбор совокупности переменных зависит от практического назначения самой системы. Численное значение вводимых переменных рассчитывается на основе статистических данных системы мониторинга. Такой подход является классическим для решения задач сетевого анализа [1-3]. Вводимые переменные, как правило, являются независимыми величинами. Задачи сетевого анализа в большинстве случаев решаются методом математического моделирования. При этом прогнозы поведения системы, выполняемые на основе статистических данных (статистические прогнозы), генерируются математическими формулами. Оценочный анализ инфокоммуникационной системы (оценочные прогнозы) максимально зависит от человеческого фактора и очень уязвим, поскольку вводимые в математическую модель допущения ограничивают область применения полученных результатов. Кроме того, при оценочном анализе велика вероятность возникновения эффекта привязки. Он заключается в том, что последующие прогнозы поведения инфокоммуникационной системы имеют тенденцию сходиться или быть близкими к исходной знакомой контрольной точке. Например, в качестве контрольной точки принято брать последнее наблюдаемое значение, т.е. на конечный результат влияет предшествующая информация, которой придается большой вес. Привязка может привести к консерватизму и недооценке новой и более актуальной информации и тем самым создать систематический уклон. Внедрение хорошо структурированных подходов к

решению подобных задач может исключить эти недостатки и значительно повысить точность полученных результатов.

В основном, целью решения задач анализа является топологическая оптимизация информационно-коммуникационной системы. В свою очередь, сеть связи также является топологической системой [4]. Поэтому решение задачи анализа сети связи сводится к нахождению оптимального пути пропускки максимального информационного потока с учетом показателей надежности, живучести, безопасности, оптимальных значений пропускной способности.

Постановка задачи

При решении задачи сетевого анализа сеть связи представляется в виде графа. Сетевые узлы являются вершинами графа, линии связи – его ребрами. Как вершинам, так и ребрам графа присваиваются некоторые величины, символизирующие вес. Весом вершины в большинстве случаев, является емкость сетевого узла, т.е. некоторая редко меняющаяся величина. Вес ребра – это величина, которая может принимать как постоянное значение, так и может быть переменной, случайной величиной. Например, если в соответствие весу ребра ставится протяженность линии связи или максимальная пропускная способность, то это значение можно принимать как постоянную величину. Но, если весу ребра присваивается какой-либо единичный или комплексный показатель надежности, например коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, интенсивность отказа, среднее время восстановления, наработка на отказ и т.п., то это значение уже является случайной величиной, зависящей от случайного события. В этом случае задачу анализа сети связи необходимо решать в несколько этапов.

Первоначально, согласно теореме Форда – Фалкерсона, необходимо найти сечения между любой парой сетевых узлов. На рисунке 1 в виде смешанного графа приведена структура сети связи. Для упрощения решения задачи вершины графа обозначены цифрами, ребра графа обозначены латинскими буквами. Необходимо найти квазисечения (поскольку ранг ограничен значением $r \leq 3$) между 6 и 5 сетевыми узлами.

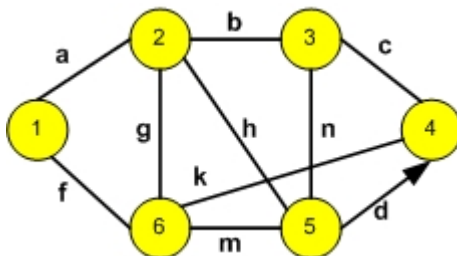


Рисунок 1 – Смешанный сетевой граф
Figure 1 – Mixed network graph

Задача может быть решена графическим или матричным методом.

После того, как сечение будет найдено, нужно дать оценку надежности выбранных путей [5]. Оценка надежности позволит скорректировать полученные на предыдущем этапе результаты.

Теоретические исследования

Графический метод определения сечения прост в использовании, достаточно легко программируется и позволяет наглядно продемонстрировать все найденные пути – от заданного сетевого узла ко всем остальным. Суть этого метода сводится к тому, что первоначально отмечаются только смежные узлы по отношению к рассматриваемому узлу. Строится первый уровень дерева $r = 1$. Далее рассматриваются уже узлы, смежные с узлами ранга $r = 1$, получаем второй уровень $r = 2$. Построение дерева путей продолжается до заданного ограничения по рангу. Из дерева путей исключаются узлы, относительно которых на предыдущих уровнях уже были образованы множества путей. Линии связи (ребра графа) прямого направления, в нашем – случае от узла, имеющего меньший номер, к узлу, имеющему больший но-

№ узла	1	2	3	4	5
1	1	a	0	0	0
2	$\bar{a}$	1	b	0	h
3	0	$\bar{b}$	1	c	0
4	0	0	$\bar{c}$	1	0
6	$\bar{f}$	$\bar{g}$	0	$\bar{k}$	$\bar{m}$

Рисунок 4 – Определитель структурной матрицы

Figure 4 – Determinant of structural matrix

Для нахождения множества квазисечений функцию m_{65} заменяем на двойственную S_{65} :

$$S_{65} = \bar{m}\bar{g}\bar{f} \cup \bar{m}h\bar{f} \cup \bar{m}\bar{g}a \cup \bar{m}ha \cup \bar{m}gh \cup \bar{m}h.$$

Результирующая формула показывает, удаление (вывод из рабочей конфигурации вследствие неработоспособного состояния) каких ребер (линий связи) приводит к несвязанной сети по отношению к выбранным узлам.

Таким образом, суммарная величина информационного потока (трафика), пропускаемого от 6 узла к 5 узлу, будет меньше либо равна сумме всех пропускных способностей ребер найденного сечения.

Однако на величину пропускаемого трафика определенное влияние оказывают показатели надежности линий связи (ребер), входящих в сечение. Коэффициент готовности является одним из них. Таким образом, для уточнения расчета величины трафика необходимо выполнить расчет коэффициента готовности каждого ребра.

На рисунке 5 показан граф состояний линии связи. Отказы линии связи обнаруживаются системой комбинированного контроля, входящего в состав системы мониторинга ее работоспособности.

На графе обозначены работоспособное и неработоспособное состояния линии связи (Р, Н), состояния проверки линии связи непрерывным и периодическим контролем (ПР, ПН), состояния восстановления после обнаружения отказа непрерывным (ВН), периодическим (ВП) и комбинированным контролем (ВНП). Переходы между состояниями графа характеризуют соответствующие события: γ – проверка линии связи, μ – интенсивность завершения контроля, интенсивность отказов линии связи, обнаруживаемых системой комбинированного контроля (ω_H , ω_P), интенсивность восстановления (ω_N).

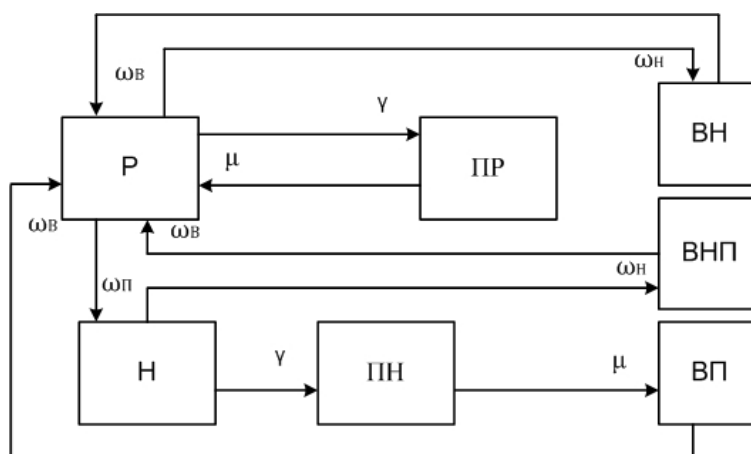


Рисунок 5 – Граф состояний линии связи

Figure 5 – Link state graph

Для вывода формул расчета коэффициента готовности и среднего времени нахождения линии связи в состоянии необнаруженного отказа использовался расчетный метод, основанный на матричном методе анализа вероятностных систем [6]. В результате:

$$K_{\Pi} = \frac{\omega_{\Pi}\omega_B + (\omega_{\Pi} + \omega_H)(\omega_H + \gamma)}{\omega_B(\omega_{\Pi} + \omega_H + \gamma) + (\omega_{\Pi} + \omega_H)(\omega_H + \gamma)},$$

$$t_H = \frac{\omega_{\Pi}}{(\omega_{\Pi} + \omega_H)(\omega_H + \gamma)},$$

$$K_r = 1 - K_{\Pi}.$$

Значения параметров, входящих в состав полученных расчетных формул, являются статистическими. При их определении используются данные системы мониторинга.

Для определения влияния расчетных показателей надежности на величину пропускаемого трафика использовался метод имитационного моделирования [7].

Экспериментальные исследования

Для построения графиков зависимости по расчетным формулам использовалась программа имитационного моделирования [7], в которую были введены статистические данные, полученные экспериментальным путем. На рисунке 6 приведены усредненные значения по всем типам поступивших вызовов за 3 месяца.



Рисунок 6 – Поступающая нагрузка
Figure 6 – Incoming load

Продолжительность наблюдений выбрана согласно [8]. Предельная относительная ошибка составляет 13 %. Длина доверительного интервала равна 0,35, двусторонняя доверительная вероятность равна 0,95. График зависимости загрузки линии связи от времени суток приведен на рисунке 7.

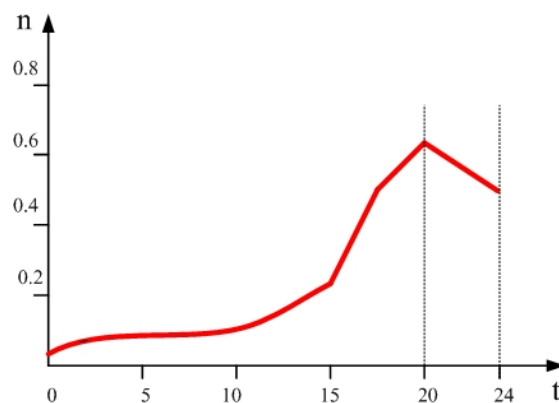


Рисунок 7 – График загрузки линии связи (n, %) от t
Figure 7 – Communication line loading schedule

На рисунке 8 приведен график зависимости среднего времени нахождения линии связи в состоянии необнаруженного отказа от времени суток.

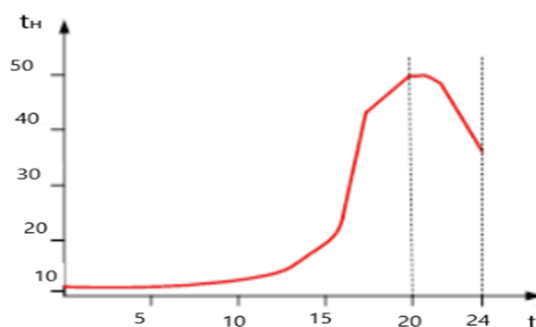


Рисунок 8 – График зависимости t_n (с) от t
Figure 8 – Dependency graph t_n (s) from t

На рисунке 9 приведены графики зависимости коэффициента простоя от интенсивности отказа линии связи за исследуемый период с учетом интенсивности восстановления.

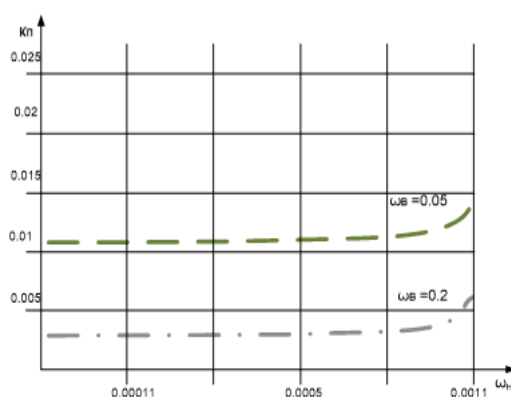


Рисунок 9 – График зависимости K_n от интенсивности отказов
Figure 9 – Dependency graph K_n from failure rate

Приведенные графики иллюстрируют влияние внешних факторов, характеризующих состояние линии связи на результат решения задачи нахождения максимальной величины пропускаемого трафика.

Заключение

При решении задач анализа инфокоммуникационных систем и, в частности сетей связи, зачастую основной целью является оценка структурной надежности, получение значений математического ожидания числа связей, определение связности сети и т.п. Однако, сетевой анализ предполагает и расчет максимальной величины пропускаемого трафика, значения которого влияют на многие качественные сетевые показатели. В связи с этим, после определения сечения сети, необходимо выполнить расчет показателей надежности выбранного пути. В статье предлагается алгоритм выполнения необходимых расчетов. Результаты расчетов получены с помощью программы имитационного моделирования и показаны в графическом виде. Математическая модель графа состояний, приведенная в статье, может претерпевать изменения в зависимости от конкретных условий эксплуатации, вида используемых линий связи и, как следствие, их подверженность различным типам отказов, а также возможностей используемой на сети системы мониторинга и других немаловажных факторов. Тем не менее изложенный подход к расчетам основных показателей трафика и надежности линии связи может скорректировать результаты, полученные на основе статистических данных с целью прогнозирования поведения системы при повышении сетевой нагрузки или при изменении условий эксплуатации.

Библиографический список

1. Wickham H. *Elegant graphics for data analysis*. 2nd ed. Springer, 2016. 213 p.
2. Шерстнева О. Г. Основы теории надежности средств и сетей связи: учеб. пособие. Новосибирск.: ГОУ ВПО СибГУТИ, 2018. 150 с.
3. Еременко В. Т. Методы и модели теории телетрафика. Орёл. ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019. 244 с.
4. Давыдов А. Е., Смирнов П. И., Парамонов А. И. Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Раздел Коммутируемые сети связи. Расчет параметров сетей связи и анализ трафика. СПб: Университет ИТМО, 2016. 47 с.
5. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. 278 с.
6. Зеленцов Б. П., Мелентьев О. Г., Шерстнева О. Г. Моделирование функционирования телекоммуникационных систем Марковскими процессами: учеб. пособие. Новосибирск.: ГОУ ВПО СибГУТИ, 2008. 150 с.
7. Шерстнева О. Г., Шерстнева А. А. Программа имитации функционирования телекоммуникационной сети с учетом реальных показателей надежности. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. № 17760. 29.12.2011.
8. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Термины и определения, М., 1990. 24 с.

UDC 681.516.77

SOLUTION TO THE PROBLEM OF COMMUNICATION NETWORK ANALYSIS WITH RELIABILITY INDICATORS

O. G. Sherstneva, Ph.D. (Tech.), associate professor, SibSUTIs, Novosibirsk, Russia;
orcid.org/0000-0003-3156-459X, e-mail: sherstneva@ngs.ru

A. A. Sherstneva, Ph.D. (Tech.), associate professor, SibSUTIs, Novosibirsk, Russia;
orcid.org/0000-0002-5849-3536, e-mail: asherstneva@sibguti.ru

The article considers the problem of the influence of reliability indicators on the value of maximum information flow in communication networks. The article is aimed to solve the problem of determining minimum cross-section between any pair of switching nodes of communication network and to calculate reliability indicators of the communication lines used. Communication network is presented as a graph. To solve the problem, graphical and matrix calculation methods are used. To determine reliability indicators a graph of the states of communication lines was compiled. The article derives formulas to calculate availability factor and average time of communication line being in inoperative state with undetected failure. According to the calculation formulas and using simulation program, the graphs of dependences between main reliability indicators and the intensity of incoming load, failure rate as well as the intensity of communication line restoration were built.

Key words: infocommunication system, section, information flow, matrix, state graph, reliability, communication network, program, modeling.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-52-58

References

1. Wickham H. *Elegant graphics for data analysis*. 2nd ed. Springer, 2016. 213 p. (in English).
2. Sherstneva O. G. *Osnovy` teorii nadezhnosti sredstv i setej svyazi: ucheb. posobie*. Novosibirsk.: GOU VPO SibGUTI, 2018, 150 p. (in Russian).
3. Eremenko V. T. *Metody i modeli teorii teletrafika*. Oryol. OGU imeni I.S. Turgeneva, 2019. 244 s.
4. Davydov A. E., Smirnov P. I., Paramonov A. I. *Proektirovanie telekommunikacionnyh sistem i setej*. Razdel Kommutiruemye seti svyazi. Raschet parametrov setej svyazi i analiz trafika. SPb: Universitet ITMO, 2016. 47 p. (in Russian).
5. Ryabinin I. A. *Nadezhnost` i bezopasnost` strukturno-slozhny`x sistem*. SPb.: Izdatel`stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2007, 278 p. (in Russian).
6. Zelenczov B. P., Melent`ev O. G., Sherstneva O. G. *Modelirovanie funkcionirovaniya telekommunikacionny`x sistem Markovskimi processami: ucheb. posobie*. Novosibirsk.: GOU VPO SibGUTI, 2008. 150 p. (in Russian).
7. Sherstneva O. G., Sherstneva A. A. *Programma imitacii funkcionirovaniya telekommunikacionnoj seti s uchetom real`ny`x pokazatelej nadezhnosti*. Svidetel`stvo o registracii e`lektronnogo resursa. №17760. 29.12.2011. (in Russian).
8. GOST 27.002-89 *Nadezhnost` v texnike. Terminy` i opredeleniya*. Moscow, 1990. 24 p. (in Russian).