

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.724

МОДЕЛЬ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С ОБНАРУЖЕНИЕМ ОТКАЗОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЕМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

В. П. Корячко, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, д.т.н., профессор; koryachko.v.p@rsreu.ru

А. П. Шибанов, д.т.н., профессор кафедры САПР ВС РГРТУ; apshibanov@yandex.ru

Х. Л. Фам, аспирант РГРТУ; hoanglong2410@gmail.com

Целью работы является нахождение вероятностно-временных характеристик процесса передачи пакетов в системах передачи данных с отказами и восстановлениями. Применяются модели случайных графов. Дается решение задачи с использованием эквивалентных упрощающих преобразований структуры GERT-сети. Используются модели с произвольным числом петель первого порядка и алгоритмы с полиномиальной вычислительной сложностью. Находятся распределения времени передачи пакетов по каналу при различных значениях вероятностей отказов оборудования и операций восстановления работоспособности канала. Рассчитываются характеристики канала, интерпретируемого как система массового обслуживания M/G/1. Определяются значения времени выполнения операций восстановления оборудования, обеспечивающие минимально допустимые значения задержки передаваемого по каналу пакета.

Ключевые слова: GERT-сети, сети передачи данных, петли первого порядка, эквивалентные упрощающие преобразования, плотность распределения выходной величины GERT-сети, система массового обслуживания M/G/1, формулы Литтла.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-58-4-37-41

Введение

Рассматривается задача оценки вероятностно-временных характеристик специализированного канала передачи информации [1–4]. В канале имеются средства проверки его готовности к выполнению текущей операции. Работоспособность канала характеризуется коэффициентом готовности. Реальные каналы могут быть не готовыми к функционированию по различным причинам:

- из-за неисправности технических средств;
- временного использования его для других целей с переключением оборудования канала (на которое затрачивается дополнительное время) в основной режим, когда появляются информационные пакеты;
- из-за изменения режимов работы канала, в частности включения резервного оборудования и т. п.

Появление такого события в дальнейшем для простоты изложения материала будем опре-

делять термином «отказ оборудования». Если данный узел канала неработоспособен, то прилагаются усилия по его восстановлению. Задаются вероятности неготовности узлов канала и вероятности его восстановления. Известен закон распределения времени восстановления канала. Использование режимов восстановления функционирования канала повышает его надежность и живучесть, но может привести к нежелательным изменениям его вероятностно-временных характеристик. Оценке количественного влияния времени операций восстановления на вероятностно-временные характеристики качества канала передачи пакетов и определению предельно допустимых значений операций восстановления и посвящается данная статья.

Теоретическая часть

Поставленная задача решается посредством использования GERT-сетей (*Graphical Evaluation and review technique*) [5]. В основе классической теории GERT-сетей лежит уравнение Мейсона.

При его использовании конечные результаты, а именно математическое ожидание и дисперсия выходной случайной величины GERT-сети, находятся через комбинации петель первого порядка (их аналогом являются контуры в ориентированном графе). Выполняемые на их основе преобразования характеризуются экспоненциальной вычислительной сложностью, поскольку используются всевозможные сочетания петель первого порядка, порождающие петли более высоких порядков. Поэтому применение топологических методов моделирования с использованием операций, основанных на всевозможных сочетаниях параметров или функциональных зависимостей контуров графа, приводит к уменьшению возможностей использования на практике GERT-сетей. В то же время имеется много задач, для моделирования которых необходимо использовать большое число операций циклического характера. Именно такой характер имеют процессы передачи пакетов с возможностью отказов оборудования сетевых каналов и выполнением операций их восстановления.

В высокопроизводительных базовых каналах крупных сетей и в специализированных сетях реального времени выделяются относительно независимые функциональные группы, имеющие средства восстановления функционирования (например, за счет резервирования аппара-

туры). Наиболее близкими областями применения такого подхода является выполнение мероприятий по обеспечению живучести и заданной надежности базовых опорных магистралей [6] на оптических волокнах в системах:

– синхронной цифровой иерархии SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*);

– в специализированных системах связи реального времени, предназначенных, например, для передачи информации от удаленных измерительных средств в центры анализа и управления испытаниями сложных технических объектов.

В частности в SDH резервируются отдельные оптические волокна, трибутарные и административные карты, блоки питания мультиплексоров, аппаратура тактовой синхронизации, система восстановления магистрали с использованием 2-х и 4-х оптоволоконных колец. Время выполнения операций восстановления работоспособности составляет 50 мс и менее.

Экспериментальные исследования

Общий подход к решению задачи моделирования сетевых каналов с использованием GERT-сетей описывается на примере канала, модель которого изображена на рисунке 1. Для определенности приняты характеристики дуг модели, приведенные в таблице 1.

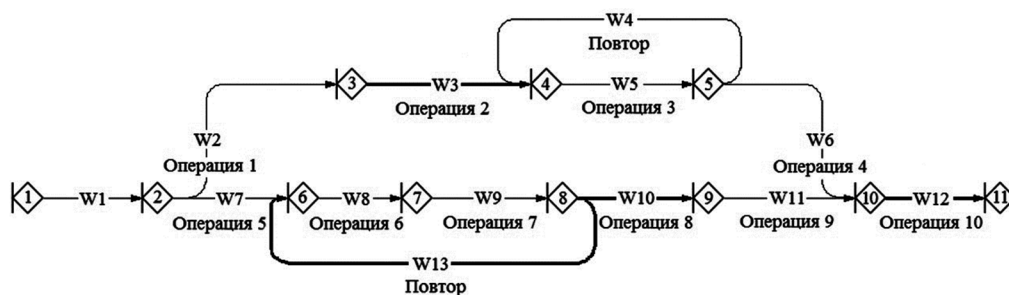


Рисунок 1 – Пример модели передачи пакета при отсутствии отказов

Таблица 1 – Характеристики исходной модели

Дуга	Вер.	Распр.	Параметры
(1,2)	1	Норм.	$m = 0, \sigma = 0,5$
(2,3)	0,5	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(3,4)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(4,5)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(5,4)	0,5	Норм.	$m = 0, \sigma = 0,1$
(5,10)	0,5	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(10, 11)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(2,6)	0,5	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(6,7)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(7,8)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(8,6)	0,5	Норм.	$m = 0, \sigma = 0,1$
(8,9)	0,5	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(9,10)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$
(10,11)	1	Эрл.	$\lambda = 2; n = 2$

Это модель канала с идеальной надежностью, и нет необходимости использовать операции восстановления работоспособности. В результате выполнения моделирования с использованием программы GERT Explorer получены значения математического ожидания времени прохождения пакета и его дисперсии соответственно: $m = 7,0$ и $\sigma^2 = 9,8$. При этом используются эквивалентные упрощающие преобразования структуры GERT-сети. На каждом шаге преобразований исключается один узел GERT-сети. Характерной особенностью преобразований является упрощение фрагментов «последовательные дуги», «параллельные дуги», «дуга-петля», при которых последовательно исключаются петли первого порядка. Для нахождения

эквивалентной функции GERT-сети (эквивалентной W -функции) не используется топологическое уравнение Мейсона, включающее в себя петли всевозможных порядков, что и определяет экспоненциальную вычислительную сложность алгоритма. Вычислительная сложность эквивалентных упрощающих преобразований характеризуется полиномом 4 степени относительно числа дуг GERT-сети [7]. Поскольку в программе GERT Explorer используются эквивалентные упрощающие преобразования, время ее работы принципиально не зависит от числа петель первого порядка в отличие от программ, использующих формулу Мейсона, как это принято в классической теории GERT-сетей [5]. Поэтому программа GERT Explorer успешно «справляется» с задачами моделирования процессов, которые характеризуются большим числом циклических операций. Это относится и к рассматриваемой в данной статье задаче моделирования сетевого канала с возможностями отказов и выполнения операций восстановления работоспособности частей аппаратуры.

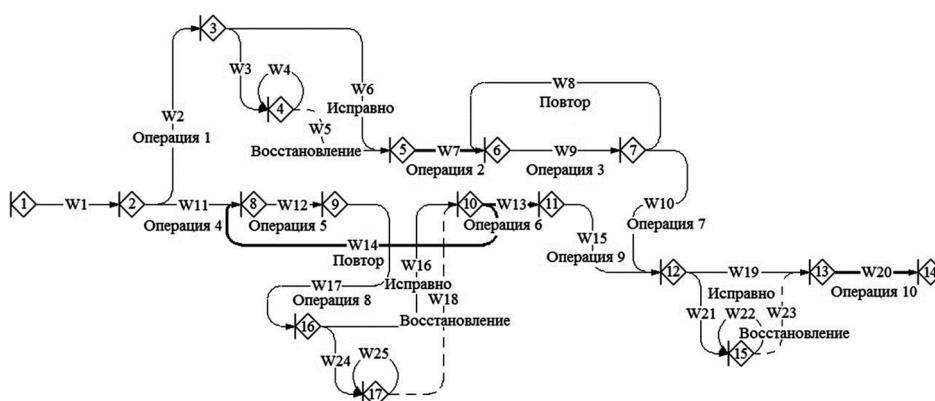


Рисунок 2 – Пример GERT-сети передачи пакета с отказами и восстановлениями каналов

На рисунке 3 изображены результаты компьютерного моделирования с использованием программы GERT Explorer. Плотность распределения вероятностей времени передачи пакета при вероятностях отказов в узлах 0,01 и вероятности восстановления работоспособности узлов с первой попытки 0,99 отмечена цифрой 1. Соответственно плотности при вероятностях отказов 0,05; 0,1 и восстановлений 0,95; 0,9 показаны цифрами 2 и 3 (на начальном участке все три кривые совпадают и при этом имеют различные моды).

В таблице 2 приведены данные о среднем времени передачи коммуникационного узла m и его дисперсии σ^2 при различных значениях времени восстановления $m_{\text{вос}}$. При увеличении вероятности отказа $P_{\text{отк}}$ и уменьшении вероятности

В модели, изображенной на рисунке 1, рассматривается протокол передачи пакета с двумя альтернативными простыми путями (1, 2, 3, 4, 5, 10, 11) и (1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11) и повторным выполнением операций (5, 4) и (8, 6).

Модель, в которую включены операции проверки и восстановления работоспособности блоков, изображена на рисунке 2. Эта относительно простая модель содержит достаточно большое число петель первого порядка:

(4, 4), (15, 15), (17, 17), (6, 7, 6), (8, 9, 16, 10, 8), (8, 9, 16, 17, 10, 8). Именно поэтому и предлагается использовать программу вычисления распределений выходных величин GERT-сетей с эквивалентными упрощающими преобразованиями, так как она не «чувствительна» к числу петель первого и более высоких порядков.

Узлы 3, 6 и 9, определяющие выполнение операций W_3 , W_{10} , W_{12} , W_{13} (рисунок 1), должны быть проверены на готовность к функционированию. Возьмем вероятности неготовности узлов равными 0,01 и 0,1. Вероятности восстановления определим как 0,99; 0,9. Операция восстановления характеризуется нормальным распределением со значениями $m_{\text{вос}} = 10; 25; 50$ и $\sigma = 0,2$.

сти выполнения операции восстановления $P_{\text{вос}}$ дисперсия σ^2 значительно увеличивается.

Таблица 2 – Результаты моделирования

$m_{\text{вос}}$	$P_{\text{отк}}/P_{\text{вос}} = 0,01/0,99$		$P_{\text{отк}}/P_{\text{вос}} = 0,1/0,9$	
	m	σ^2	m	σ^2
10	7,3	12,8	9,5	38,5
25	7,6	26,5	13,1	160,3
50	8,2	71,4	17,0	425,3

Это приводит к ухудшению характеристик узла коммутации, который описывается системой массового обслуживания (СМО) $M/G/1$, характеризующейся пуассоновским входящим потоком при произвольном времени обслуживания, задаваемом распределением времени выполнения GERT-сети.

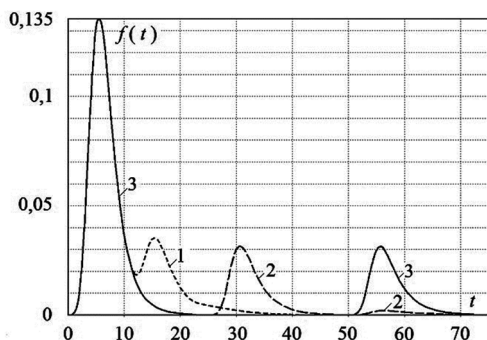


Рисунок 3 – Плотность распределения времени передачи пакета с отказами и восстановлениями каналов

Изменяя входные данные СМО $M/G/1$, можно решить задачу определения нормативного времени восстановления отказавшего узла. Для современного сетевого оборудования при передаче синхронного трафика (чувствительного к задержкам пакетов) это время равно 50 мс, но может быть задано и меньшее значение. Одним из важнейших показателей качества канала является среднее время ожидания пакета в очереди на обслуживание коммуникационного узла $\bar{W}$. Оно определяется формулой Поллачека-Хинчина [8]:

$$\bar{W} = \frac{\rho \bar{X}(1 + C^2)}{2(1 - \rho)}, \quad (1)$$

где $\bar{X}$ – среднее время передачи пакета через коммутационный узел (без учета времени ожидания в очереди), $C^2 = \sigma^2 / m^2$ – квадрат коэффициента вариации времени передачи пакета, $\rho = \lambda \bar{X}$ – нагрузка обслуживающего прибора СМО. На рисунке 4 приведены зависимости $\bar{W} = f(\rho)$ при коэффициенте готовности узлов и операций их восстановления, равных 0,99 (кривые 1-3) и 0,9 (кривые 4-6).

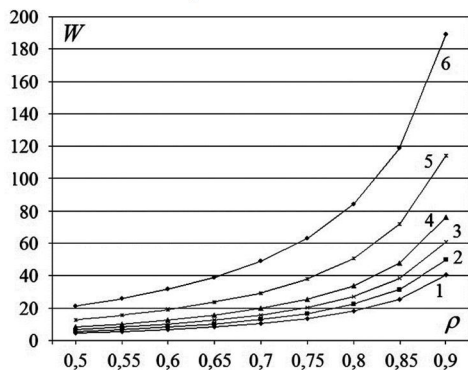


Рисунок 4 – Зависимость средней длины очереди от величины нагрузки

При $\rho \rightarrow 1$ среднее время пребывания пакета в очереди резко возрастает. Можно найти за-

висимости среднего времени пребывания пакета в коммуникационном узле $\bar{T}$ от величины нагрузки ρ по формуле:

$$\bar{T} = \bar{X} + \frac{\rho \bar{X}(1 + C^2)}{2(1 - \rho)}. \quad (2)$$

Среднее число пакетов в очереди коммутационного узла $\bar{Q}$ и среднее число заявок в системе $\bar{N}$ определяем по формулам Литтла $\bar{N} = \lambda \bar{T}$ и $\bar{Q} = \lambda \bar{W}$ [9].

Приемлемое среднее время задержки пакета при условии возможного возникновения отказов с заданным временем операций восстановления может быть определено по формуле (1) или (2). Этому однозначно соответствуют значения $\rho < 1$ и допустимой интенсивности входной нагрузки λ .

Заключение

Наиболее важные результаты и положения статьи заключаются в следующем:

- использована модель $M/G/1$, в которой входной поток является пуассоновским, часто используемым для моделирования компьютерных сетей. Например, при средних и больших нагрузках (в стационарном режиме) на основании теоремы Джексона [10] слияние потоков на входе узла и вероятностное разделение потока на его выходе описываются как действия над потоками Пуассона;

- в модели $M/G/1$ время работы обслуживающего прибора характеризуется распределением произвольного вида, рассматриваемым как выходная величина GERT-сети. Это позволяет моделировать сложные процессы, состоящие из последовательно выполняемых операций со случайным временем выполнения и вероятностными ветвлениями;

- в статье предложена модель для расчета времени восстановления работоспособности базового опорного сетевого канала с использованием эквивалентных упрощающих преобразований GERT-сети. При этом известны характеристики случайного времени выполнения множества операций восстановления и вероятности отказа отдельных технических систем. Доказана возможность применения данного подхода для моделирования систем и процессов с большим числом циклов.

Статья подготовлена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 16-07-00106-а.

Библиографический список

1. Корячко В. П., Лукьянов О. В., Шибанов А. П. Нахождение скрытого параллелизма протоколов для улучшения характеристик сети передачи данных по-

лигонного измерительного комплекса // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 68-75.

2. **Корячко В. П., Лукьянов О. В., Шибанов А. П.** Сеть передачи измерительной информации с разделением трафика на профили // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 9-15.

3. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Сапрыкин А. Н., Лукьянов О. В.** Планирование потоков в сети передачи данных опто-электронных средств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 55-59.

4. **Корячко В. П., Шибанов А. П., Сапрыкин А. Н., Фам Х. Л.** Планирование полосы пропускания сетевых каналов при проведении испытаний летательных аппаратов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 52-57.

5. **Pritsker A. A.** Graphical Evaluation and review technique. MEMORANDUM RM-4973-NASA APREL 1966.

6. **Олифер В.** Отказоустойчивость как залог надежности // Журнал сетевых решений/LAN. № 6. 2002. <http://www.osp.ru/lan/2002/06/136259/>

7. **Shibanov A. P.** Finding the distribution density of the time taken to fulfill the GERT network on the basis of equivalent simplifying transformation. Automation and Remote Control. Plenum Press New York, NY, USA. February 2003. Volume 64. Issue 2. pp. 279-287.

8. **Хинчин А. Я.** Работы по математической теории массового обслуживания. Москва: Физматгиз, 1963.

9. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания. – М: Машиностроение, 1979. 432 с.

10. **Бертсекас Д., Галлагер Р.** Сети передачи данных. – М.: Мир, 1989. 544 с.

UDC 004.724

DATA CHANNEL MODEL WITH FAULT DETECTION AND DISASTER RECOVERY

V. P. Koryachko, PhD (technical sciences), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan; koryachko.v.p@rsreu.ru

A. P. Shibanov, PhD (technical sciences), full professor, RSREU, Ryazan; apshibanov@yandex.ru

X. L. Fam, post-graduate student, RSREU, Ryazan; hoanglong2410@gmail.com

The aim of the work is to find probability-time characteristics of packet transmission process in failure and recovery systems. Models of random graphs are used. We give a solution to the problem using equivalent reforms simplifying GERT-network structure. The model is used with an arbitrary number of loops of the first order and algorithms with polynomial computational complexity. Distributions of packet transmission time on the channel at different values of the probabilities of equipment failures and channel performance recovery operations are found. Channel characteristics treated as M/G/1 queueing system are calculated. The values of the execution time of equipment recovery operations ensuring minimum permissible delays of transmission channel package are determined.

Key words: data network, GERT-network, a first order loop equivalent simplifying transformations, the density distribution of the output values GERT-network queueing system M/G/1, Little's formula.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-58-4-37-41

References

1. **Koryachko V. P., Lukyanov O. V., Shibanov A. P.** Nahozhdenie skrytogo parallelizma protokolov dlja uluchsheniya harakteristik seti peredachi dannyh poligon-nogo izmeritel'nogo kompleksa. Vestnik Rjazans-kogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014, no. 47, pp. 68-75 (in Russian).

2. **Koryachko V. P., Lukyanov O. V., Shibanov A. P.** Set' peredachi izmeritel'noj informacii s razdeleniem trafika na profile. Usp'ehi sovremennoj radiojelektroniki. 2014, no. 10, pp. 9-15 (in Russian).

3. **Koryachko V. P., Shibanov A. P., Saprykin A. N., Lukyanov O. V.** Planirovanie potokov v seti peredachi dannyh optiko-jelektronnyh sredstv. Vestnik Rjazans-kogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. 2014, no. 50-1, pp. 55-59 (in Russian).

4. **Korjachko V. P., Shibanov A. P., Saprykin A. N., Fam H. L.** Planirovanie polosity propuskaniya setevykh kanalov pri provedenii ispytaniy letatel'nyh apparatov // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekh-

nicheskogo universiteta. 2016. no 56. pp. 52-57. (in Russian).

5. **Pritsker A. A.** Graphical Evaluation and review technique. MEMORANDUM RM-4973-NASA APREL 1966.

6. **Oliifer V.** Otkazoustojchivost' kak zalog nadezhnosti // Zhurnal setevykh reshenij/LAN. № 6. 2002. <http://www.osp.ru/lan/2002/06/136259/>

7. **Shibanov A. P.** Finding the distribution density of the time taken to fulfill the GERT network on the basis of equivalent simplifying transformation. Automation and Remote Control. Plenum Press New York, NY, USA. February 2003. Volume 64. Issue 2. P. 279-287.

8. **Hinchin A. Ja.** Raboty po matematicheskoj teorii massovogo obsluzhivaniya. Moskva: Fizmatgiz. 1963.

9. **Kleinrock L.** Teorija massovogo obsluzhivaniya (Queueing Theory), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 432 p. (in Russian).

10. **Bertsekas D., Gallager R.** Seti peredachi dannyh (Data Transfer Networks), Moscow, Mir, 1989, 544 p. (in Russian).