

УДК 004.3

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОТКАЗОВ
КОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ НА СНИЖЕНИЕ
КОММУНИКАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНЫХ
СИСТЕМ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ****В.А. Богатырев, Е.Ю. Котельникова**

Анализируется влияние накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств, оценено отрицательное влияние числа и комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров на снижение производительности коммуникационной подсистемы.

Ключевые слова: отказоустойчивость, деградация, коммуникационная подсистема, среднее время пребывания запросов.

Введение

Высокая отказоустойчивость и производительность распределенных компьютерных, особенно управляющих, систем обеспечивается резервированием вычислительных и телекоммуникационных средств. Интенсивность снижения эффективности коммуникационной подсистемы зависит от числа и комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров, связывающих компьютерные узлы с резервированными коммуникационными средствами (коммутаторами или магистральями).

Целью статьи является анализ влияния комбинаторного расположения отказавших сетевых адаптеров, связывающих компьютеры с резервированными коммуникационными средствами, на отказоустойчивость и снижение эффективности функционирования коммуникационной подсистемы.

**Типовые структуры компьютерных систем с резервированной
коммуникационной подсистемой**

Типовые структуры управляющих компьютерных систем предусматривают резервирование коммуникационной подсистемы, построенной на основе магистралей или коммутаторов. Структура компьютерной системы, содержащей m равноправных компьютерных узлов, объединенных через n магистралей, приведена на рис. 1, а, а через n коммутаторов – на рис. 1, б. Структура двухуровневой компьютерной системы (например, с выделением клиентских и серверных компьютеров) приведена на рис. 2. Подключение компьютерного узла к одной магистрали или порту коммутатора требует одного сетевого адаптера (СА).

Состояние рассматриваемых резервированных коммуникационных подсистем отображается матрицей $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, элемент которой $s_{ij}=1$, если j -й узел способен к взаимодействию с i -й исправной магистралью (i -м коммутатором), т.е. осуществляющий соответствующее подключение адаптер исправен, в противном случае $s_{ij}=0$. В исходном состоянии при полном доступном подключении компьютерных узлов к магистралям (коммутаторам) все элементы матрицы $s_{ij}=1$. При неполнодоступном подключении или в результате отказов часть элементов матрицы могут быть нулевыми [1]. При отказе i -й магистрали (коммутатора) все элементы i -й строки равны нулю.

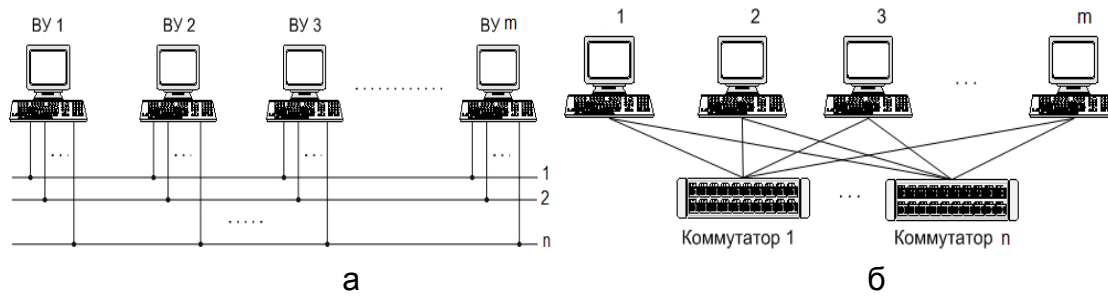


Рис. 1. Одноуровневая организация компьютерной системы: а – с резервированием магистралей, б – с резервированием коммутаторов

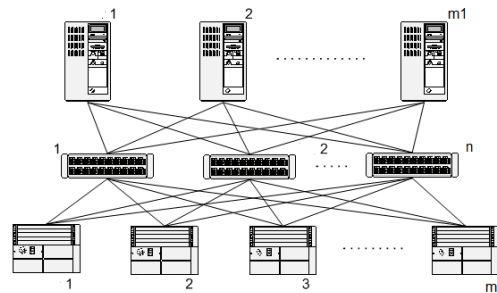


Рис. 2. Двухуровневая организация компьютерной системы

Постановка задачи

Работоспособность и эффективность состояний коммуникационной подсистемы зависят не только от числа отказавших адаптеров и магистралей, но и от их комбинаторного расположения. В статье проводится оценка влияния накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств. Ставится задача оценки отказоустойчивости и эффективности взаимосвязи компьютерных узлов через коммуникационную подсистему при возникновении различных комбинаций отказов сетевых адаптеров, отображаемых матрицей $\|s_{ij}\|$.

При бесприоритетной (циклической или случайной) дисциплине выбора магистралей для передачи оценивается влияние размещения отказавших адаптеров на сбалансированность загруженности различных магистралей и на среднее время пребывания запросов (пакетов) в коммуникационной подсети. Предполагается идентичность параметров всех однотипных коммуникационных средств и независимость их отказов. Функционирование компьютерных и коммуникационных узлов (коммутаторов или магистралей) представляется простейшими системами массового обслуживания типа $M/M/1$ с бесконечной очередью.

Условия работоспособности коммуникационной подсистемы

Для одноуровневых систем будем считать, что компьютерная система работоспособна, если между любой парой из m компьютерных узлов осуществима взаимосвязь хотя бы по одной из n магистралей для систем по рис. 1, а, или хотя бы через один коммутатор для систем по рис. 1, б. Для двухуровневых систем по рис. 2 условие работоспособности коммуникационной подсистемы заключается в обеспечении взаимосвязи между компьютерными узлами разных уровней (например, между рабочими станциями и серверами), причем взаимосвязь между компьютерными узлами одного уровня

не обязательна. Для одноуровневых вычислительных систем (рис. 1) взаимосвязь между a -м и b -м узлами поддерживается по i -ой магистрали, если сетевые адаптеры, связывающие с ней a -й и b -й узлы, исправны, т.е. имеется хотя бы одна строка матрицы $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, у которой в a -м и b -м столбцах находятся единичные элементы.

Таким образом, для одноуровневых вычислительных систем признак отказа – возможность выделения в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ подматрицы из двух столбцов (a -го и b -го), в каждой строке которой содержится не более одной единицы [9]. В этом случае отказ коммуникационной подсистемы возможен только после отказа $\zeta=n$ адаптеров. Максимальное число отказавших СА, при котором возможно сохранение функционирования системы, $\theta=(n-1)m$. Заметим, что при отказе $(n-1)m$ СА система работоспособна, если все m исправных СА подключены к одной из n магистралей.

Для двухуровневых вычислительных систем (рис. 2) выделим в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ две подматрицы S_1 и S_2 (размерности $n \times m_1$ и $n \times m_2$, $m_1 + m_2 = m$), первая из которых отображает исправность адаптеров подключения к магистралям клиентов, а вторая – серверов.

Таким образом, для двухуровневых вычислительных систем признак отказа – возможность выделения в матрице $\|s_{ij}\|_{n \times m}$ подматрицы S_{12} из двух столбцов (a -го и b -го), один из которых принадлежит подматрице S_1 , а второй подматрице – S_2 , причем в каждой строке S_{12} содержится не более одной единицы [9].

Показатели отказоустойчивости коммуникационной подсистемы

Система показателей отказоустойчивости коммуникационной подсистемы должна отражать динамику сохранения эффективности при возникновении одного, двух или большего числа отказов СА.

Отказоустойчивость коммуникационной подсистемы характеризуют [2–5] следующие параметры: ζ – минимальное число и распределение отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов), которое может привести к нарушению ее связности, т.е. к отказу коммуникационной подсистемы (ζ – число элементов, образующих минимальное сечение); θ – максимальное число отказов СА, при котором возможно сохранение работоспособности коммуникационной подсистемы.

Условная вероятность сохранения работоспособности (связанности) резервированной коммуникационной подсистемы при наличии s отказов СА и $N-n$ отказов магистралей (коммутаторов) вычисляется как $\beta_{sn} = N_s / C_{mn}^s$, где C_{mn}^s и N_s – общее число и число работоспособных состояний системы при условии возникновения s отказов СА ($s \leq \theta$) и целостности n магистралей (коммутаторов).

Среднее число выдерживаемых коммуникационной подсистемой отказов СА s^* при условии исправности n магистралей (коммутаторов) равно

$$s^* = \sum_{s=1}^{\theta} s(1-\beta_{sn})C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где p – надежность (вероятность работоспособности) СА. Среднее число выдерживаемых коммуникационной подсистемой отказов СА S с учетом состояний при различной кратности отказов магистралей (коммутаторов) равно

$$S = \sum_{n=1}^N C_N^n p_0^n (1-p_0)^{N-n} \sum_{s=1}^{\theta} s(1-\beta_{sn})C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где p_0 – надежность (вероятность работоспособности) одного коммутатора (магистрали).

Исследуемые системы относятся к категории сложных систем с множеством работоспособных состояний, обладающих различной эффективностью взаимосвязи, поэтому в качестве основного показателя надежности таких систем рекомендуется [4, 5] коэффициент сохранения эффективности $K_{эф}$. При расчете $K_{эф}$ каждому состоянию объекта, определенному совокупностью состояний его элементов (СА), сопоставляется доля сохраняемой номинальной эффективности от 0 до 1 [4]. Для коммуникационной подсистемы эффективность состояний определим величиной, обратной среднему времени пребывания в системе запросов на передачу кадров. В этом случае коэффициент сохранения эффективности определим как

$$K_{эф} = \sum_{n=1}^N C_N^n p_0^n (1-p_0)^{N-n} \sum_{s=1}^{\theta} E_{sn} \beta_{sn} C_{mn}^s p^{nm-s} (1-p)^s,$$

где $E_{sn} = w/w_{sn}$, а w и w_{sn} – соответственно среднее время пребывания кадров (запросов) в исходном состоянии системы (без отказов СА и магистралей) и в системе с отказом s СА и $N-n$ магистралей.

Условную вероятность сохранения работоспособности (связанности) резервированной коммуникационной при наличии s отказов СА и $(N-n)$ отказов магистралей (коммутаторов) для одноуровневых компьютерных систем можно приближенно вычислить на основе комбинаторного метода включения исключения [6–9]:

$$\beta_{sn} = 1 - \frac{C_{n(m-1)}^{s-n} (m + C_m^2 2^{n-1})}{C_{mn}^s}.$$

Оценка влияния накопления отказов на снижение эффективности коммуникационной подсистемы

Снижение эффективности функционирования по мере накопления отказов, выраженное как $E_{sn} = w/w_{sn}$, во многом определяется влиянием на среднее время пребывания запросов (кадров) несбалансированности каналов взаимосвязи, возникающей при существенной разнице числа исправных СА, подключенных к разным магистралям (коммутаторам).

Каждое состояние коммуникационной подсистемы представляется матрицей $\|s_{ij}\|_{n \times m}$, при этом среднее время пребывания запросов при распределении потока запросов по всем исправным магистралям определяется как

$$T_{sn} = \sum_{i=1}^n \frac{b_i v}{1 - b_i \lambda v},$$

где b_i – вероятность передачи кадра через i -ю магистраль (коммутатор), v – среднее время передачи кадра через магистраль, λ – интенсивности входного потока запросов на передачу кадров между компьютерами.

Зависимости доли сохранения эффективности относительно исходного состояния (при исправности всех коммуникационных средств) вычислим как

$$E_{sn} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{b_i v}{1 - b_i \lambda v} \right) / \left(\frac{v}{1 - \frac{\lambda v}{n}} \right).$$

Для одноуровневых вычислительных систем (рис. 1), содержащих m компьютеров и n магистралей (коммутаторов), вероятность передачи через i -ю магистраль составляет

$$b_i = C_{\sum_{j=1}^m s_{ij}}^2 / \sum_{i=1}^n C_{\sum_{j=1}^m s_{ij}}^2,$$

где числитель определяет число всевозможных пар компьютеров, связь между которыми возможна по i -й магистрали.

Для двухуровневых вычислительных систем (рис. 2) с n магистралями (коммутаторами), содержащих m компьютеров, в том числе m_1 клиентских и m_2 серверных узлов, вероятность передачи через i -ю магистраль равна

$$b_i = \left(\sum_{j=1}^{m_1} s_{ij} \right) \left(\sum_{j=m_1+1}^{m_2} s_{ij} \right) / \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^{m_1} s_{ij} \right) \left(\sum_{j=m_1+1}^{m_2} s_{ij} \right) \right],$$

а для двухуровневых компьютерных систем при серверах, подключенных к n магистралям (коммутаторам) через все исправные СА,

$$b_i = \sum_{j=1}^m s_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_{ij}.$$

В последнем случае зависимостям среднего времени пребывания кадров от интенсивности входного потока λ при связанности клиентских компьютеров с магистралями, представленной матрицами S_1 вида

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

соответствуют кривые 1–3 на рис. 3 (подматрица S_2 содержит все единицы). Расчеты проведены при среднем времени передачи кадра $\nu=1$ с.

Зависимости доли сохранения эффективности E после отказов СА для второй и третьей матриц S_1 относительно исходного состояния при $\nu=1$ с представлены кривыми 2 и 1 на рис. 4.

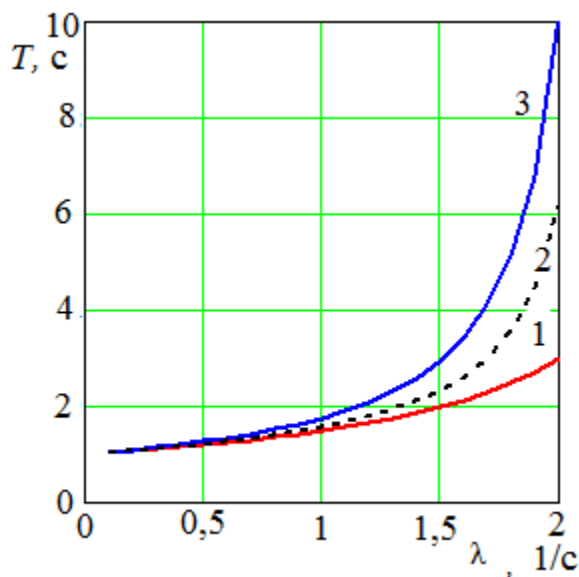


Рис. 3. Среднее время пребывания кадров в коммуникационной подсистеме

Из представленных на рис. 3 и 4 графиков следует, что при равномерном распределении единиц в матрице S (характеризующем расположение исправных СА) существенно повышается эффективность конфигурации (даже при одинаковом числе сохраненных СА), следовательно, при выборе структур с неполнодоступным подключением компьютеров к коммутаторам (магистралям) следует решать оптимизационную задачу.

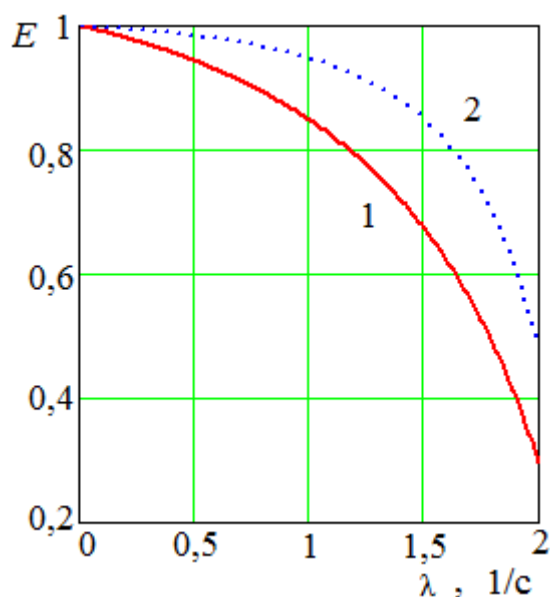


Рис. 4. Доля сохранения эффективности при отказах адаптеров относительно исходного состояния

Выводы

Оценено отрицательное влияние накопления отказов сетевых адаптеров и магистралей (коммутаторов) на снижение коммуникационных возможностей типовых структур компьютерных систем с резервированием коммуникационных средств.

Предложена оценка отрицательного влияния отказов сетевых адаптеров на сбалансированность коммуникационной системы, снижающую ее производительность, для одноуровневых и многоуровневых вычислительных систем в зависимости от взаиморасположения отказавших сетевых адаптеров.

Рассмотренные оценки рекомендуются к использованию при выборе протоколов взаимосвязи, обеспечивающих после возникновения отказов сетевых адаптеров сбалансированность нагрузки резервированной коммуникационной подсистемы.

Литература

1. Богатырев В.А. Отказоустойчивость и сохранение эффективности функционирования многомагистральных распределенных вычислительных систем // Информационные технологии. – 1999. – № 9. – С. 44–48.
2. Волик Б.Г. О дискуссии на IV Всесоюзном совещании «Надежность, живучесть и безопасность автоматизированных комплексов» // Приборы и системы управления. – 1989. – № 11. – С. 2–3.
3. Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем. – М.: Знание, 1987. – 56 с.
4. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 27 с.
5. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 15 с.
6. Богатырев В.А. К оценке среднего времени ожидания передачи кадров через резервированный канал с ограниченными коммуникационными возможностями магистралей // Автоматика и вычислительная техника. – 1998. – № 1. – С.77–80.

7. Богатырев В.А. Комбинаторный метод оценки отказоустойчивости многомагистрального канала // Методы менеджмента качества. – 2000. – № 4. – С. 30–35.
8. Богатырев В.А. Комбинаторно-вероятностная оценка надежности и отказоустойчивости кластерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 6. – С.21–26.
9. Богатырев В.А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. – 2006. – № 9. – С. 25–30.

Богатырев Владимир Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com

Котельникова Елена Юрьевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, elka842@yandex.ru.