

УДК 681.324

**АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КОММУТАТОРОВ МЕДИАДАНЫХ
НА ОСНОВЕ МНОГОСВЯЗНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ**

А.А. БОРИСКЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 12 ноября 2004*

Представлены результаты анализа и выбора структур коммутаторов мультимедийных данных на основе дельта-системы и многосвязного кольцевого соединителя, а также их модификаций. Произведена оценка эффективности различных структур коммутационных систем по характеристикам "сложность–блокируемость" в условиях различных значений коммутационной емкости, интенсивности поступления потока нагрузки, связности и структурной избыточности. Предложена структура многослойной иерархической коммутационной системы на основе многосвязных кольцевых соединителей, характеризующаяся высокой эффективностью реализации в широком диапазоне изменения структурных параметров и нагрузки. Показано, что достаточно малые значения вероятности потерь и величины задержки пакетов, требуемые при распределении мультимедийного трафика, критичного к потерям и задержкам, могут быть достигнуты за счет увеличения связности и числа уровней в многосвязном кольцевом соединителе.

Ключевые слова: мультисервисные сети, мультимедийные данные, коммутаторы мультимедийных данных.

Введение

Ближайшей перспективой развития сетей телекоммуникаций является переход к сетям связи следующего поколения — NGN (Next Generation Network), развертывание которых основано на строительстве мультисервисных сетей — FSN (Full Service Network) или, согласно рекомендациям ИТУ-Т серии Y.110, GI (Global Information Infrastructure). Структура FSN адаптирована для предоставления услуг по хранению, обработке и распределению информации, включая мультимедийные данные, в рамках множества сетевых сервисов [1].

Коммутаторы FSN обеспечивают распределение информации в соответствии с соглашением об уровне сервиса (SLA — Service Level Agreement) и строятся на основе асинхронных систем коммутации, функционирующих, как правило, в режиме быстрой коммутации пакетов (БКП). Режим БКП в сочетании с технологией виртуальных соединений позволяет обеспечить необходимые параметры передачи, требуемые SLA, для различных видов информации. Мультимедийные данные представляют комплексный вид информации с соответствующим SLA. Поэтому коммутаторы медиаданных должны обеспечивать адаптацию параметров виртуальных каналов к изменяющемуся характеру трафика (речь, аудио, данные, изображение, видео).

Достижимый уровень сервиса и сложность механизмов его поддержания определяются, прежде всего, используемой технологией: ATM, MPLS, TCP/IP, Frame Relay. Кроме того, существенное влияние на уровень сервиса и параметры процесса распределения информации оказывают характеристики коммутаторов, прежде всего, пропускная способность, вероятность по-

терь пакетов, сложность реализации, которые в свою очередь определяются принципами построения и характеристиками коммутационной системы.

Для коммутаторов FSN небольшой емкости используются неблокируемые однозвенные коммутационные системы на основе общей шины, разделяемой памяти, кольцевых структур и полносвязной топологии на мультиплексорах [2]. Коммутаторы большой емкости строятся на многозвенных коммутационных системах, обеспечивающих один или несколько промежуточных путей для каждой пары вход-выход за счет каскадирования однозвенных неблокируемых коммутаторов различного типа.

Одной из основных характеристик многозвенных коммутационных схем является вероятность блокировки, уменьшение которой достигается за счет структурной избыточности (организации множества промежуточных путей для передачи пакета). Для уменьшения вероятности потерь пакетов в коммутационной системе с блокировками используется также буферизация, реализуемая во входных, промежуточных и выходных накопителях. Буферизация приводит к увеличению задержек передачи пакетов через коммутатор и сеть в целом. Величина и разброс значений задержек пакетов существенно влияют на качество передачи речи и видео, представляющих часть мультимедийного трафика, критичного к задержкам, и определяются соответствующими SLA. Поскольку время ожидания пакета в буфере ограничено и существует вероятность его превышения, задержки передачи, наряду с блокировками, определяют потери пакетов в коммутаторе.

Теоретическая и экспериментальная части

Для построения коммутаторов мультимедийных данных используются самомаршрутизирующиеся коммутационные системы. Самомаршрутизация позволяет достичь высокой производительности коммутационной системы при распределении мультимедийного трафика с высокими требованиями к скорости передачи и величине задержки за счет исключения центрального управляющего устройства, распределения и распараллеливания процессов управления по коммутационным элементам (КЭ). Кроме того, самомаршрутизация как способ поиска свободного пути между КЭ в коммутационном поле с ростом коммутационной емкости не имеет альтернативы, поскольку реализация алгоритмов централизованного управления приводит к значительным вычислительным затратам и сложности реализации, что отрицательно сказывается на параметрах передачи пакетов мультимедийного трафика, критичного к задержкам.

Благодаря простоте структуры и алгоритмов самомаршрутизации пакетов распространены многозвенные коммутационные системы с одним промежуточным путем типа баньян, в частности дельта-системы, а также их модификации, приводящие к построению коммутационных систем с несколькими промежуточными путями, например модифицированные дельта-системы [2].

Прямоугольная дельта-система (ДС) емкостью $N \times N$ (N входов и N выходов) состоит из K каскадов:

$$K = \log_s N, \quad (1)$$

каждый из которых содержит по M коммутационных элементов (КЭ), емкостью $S \times S$ каждый:

$$M = N/S. \quad (2)$$

Параметр S определяет связность КЭ в ДС. Благодаря простоте управления процессом самомаршрутизации пакетов наибольшее распространение получили ДС, имеющие $S=2$ (рис. 1).

Вероятность блокировки пакета в ДС определяется как вероятность блокировки в последовательном соединении K коммутационных элементов:

$$P = 1 - (1 - P_E)^K, \quad (3)$$

где P_E — вероятность блокировки пакета в КЭ.

При последовательном соединении каждый КЭ дельта-системы представляется моделью однозвенного пространственного коммутатора емкостью $S \times I$ с интенсивностью поступления потока нагрузки по каждому входу λ/S и интенсивностью ухода $\mu=1$. При небольших значениях S для расчета P_E может быть использована формула Энгсета [3]:

$$P_E = \frac{AC_S^1}{1 + AC_S^1}, \quad A = \frac{\lambda}{\mu S}, \quad C_S^1 = \frac{S!}{(S-1)!}. \quad (4)$$

Наряду с баньяновидными коммутационными системами для построения коммутаторов FSN представляют интерес многосвязные кольцевые соединители (МСКС) [4]. Пример двухсвязной коммутационной системы с числом M коммутационных элементов в каждой связи представлен на рис. 2.

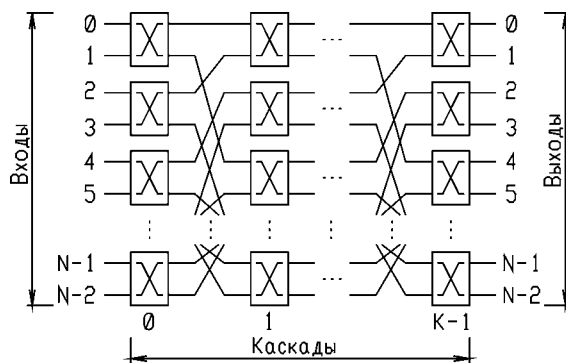


Рис. 1. Структура дельта-системы, $S=2$

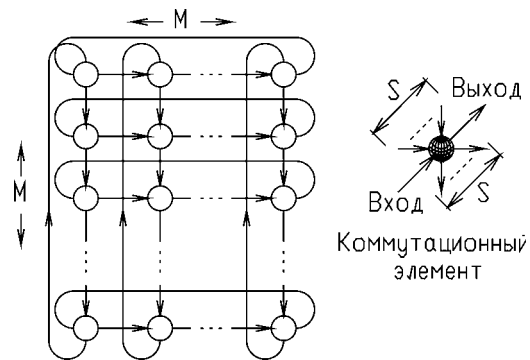


Рис. 2. Структура многосвязного кольцевого соединителя, $S=2$

МСКС емкостью $N \times N$ образуется соединением в кольцо M коммутационных элементов емкостью $(S+1) \times (S+1)$ в каждой из S связей. При этом S входов и S выходов каждого КЭ используются для соединения с другими КЭ, а один вход и один выход являются внешними входом и выходом МСКС (рис. 3). Число M коммутационных элементов в каждой связи определяется как

$$M = \log_S N. \quad (5)$$

Моделью МСКС является обобщенный гиперкуб с S ребрами длиной M каждое [5]. Обобщенный гиперкуб лежит в основе многих высокопроизводительных вычислительных систем [6]. Данная модель предложена также для построения коммутатора каналов с централизованным управлением [7].

МСКС является многосвязной коммутационной системой со множеством промежуточных путей между произвольной парой вход-выход, которая обеспечивает параллельное и конвейерное распределение информации по всем связям. При равенстве интенсивности поступления потока нагрузки λ в МСКС по каждому входу и интенсивности уходов средняя интенсивность нагрузки на промежуточных связях между КЭ в МСКС составляет λ/S . Тогда средняя интенсивность λ' нагрузки с учетом внешнего входа КЭ составляет:

$$\lambda' = \frac{2\lambda}{S+1}. \quad (6)$$

Вероятность ухода пакета по внешнему выходу пренебрежимо мала и может не учитываться при расчете вероятности блокировки коммутационного элемента МСКС. В таком случае КЭ может быть представлен моделью однозвенного пространственного коммутатора емкостью $(S+1) \times S$, вероятность блокировки пакета в котором определяется формулой Энгсета [3]:

$$P_E = \frac{BC_{S+1}^S}{\sum_{i=0}^S BC_{S+1}^i}, \quad B = \frac{\lambda'}{\mu}, \quad C_{S+1}^S = \frac{(S+1)!}{S!}, \quad C_{S+1}^i = \frac{(S+1)!}{(S+1-i)! i!}. \quad (7)$$

Каждый КЭ в МСКС имеет S альтернативных выходов для передачи информации. Это существенно снижает вероятность блока КЭ по сравнению с дельта-системой, особенно с ростом связности S . Как и в случае ДС, вероятность блокировки пакета в МСКС определяется вероятностью блокировки пакета в последовательном соединении КЭ. Число последовательно соединенных КЭ в случае МСКС непостоянно и зависит от номеров входа и выхода, между которыми устанавливается соединение, а также от выбора маршрута передачи пакета. Хотя каждый КЭ обеспечивает S альтернативных маршрутов передачи пакета, однако не все они соответствуют кратчайшему пути. С ростом интенсивности поступления потока нагрузки по входам МСКС увеличивается вероятность того, что не будет выбран кратчайший путь передачи пакета в КЭ. В результате увеличивается число последовательно соединенных КЭ в маршруте и, следовательно, вероятность блокировки.

Для моделирования данного свойства предлагается использовать при расчете числа K коммутационных элементов в последовательном соединении линейную зависимость вида

$$K = M + \lambda N, \quad (8)$$

в которой первое слагаемое представляет среднюю длину маршрута передачи пакета в МСКС, а второе — увеличение длины маршрута с ростом интенсивности поступления потока нагрузки, стремящееся в пределе к числу N коммутационных элементов в МСКС (рис. 4).

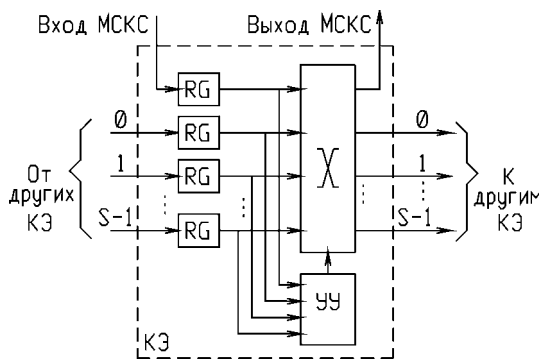


Рис. 3. Структура коммутационного элемента МСКС

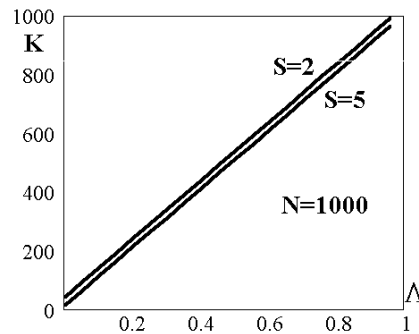


Рис. 4. Зависимость числа каскадов МСКС от нагрузки при различной связности

Вероятность блокировки пакета в МСКС определяется по формуле (3).

Для оценки сложности коммутационной системы целесообразно использовать число E коммутационных элементов, число R связей между КЭ, число C логических элементов, реализующих двухместную конъюнкцию в составе мультиплексоров КЭ (элементов "И"). Соотношения, определяющие перечисленные характеристики для ДС и МСКС представлены в таблице.

Для сравнительной оценки свойств коммутационных систем на ДС и МСКС предлагается использовать характеристики "сложность–блокируемость" в отношении числа КЭ (V_E), числа элементов "И" (V_C) и числа связей между КЭ (V_R) в условиях одинаковых емкости, связности и нагрузки. Данные характеристики определяются соотношениями:

$$V_E = EP, \quad V_C = CP, \quad V_R = RP, \quad (9)$$

$$V = V_E V_C V_R. \quad (10)$$

Последняя из приведенных характеристик коммутационной системы V является комплексной и учитывает совокупность всех остальных.

Для анализа и оценки МСКС и ДС на их основе разработаны математические модели коммутационных систем без промежуточных накопителей одинаковой емкости.

Соотношения для определения сложности реализации коммутационных систем

	Характеристика	Коммутационная система	
		ДС	МСКС
E	Число коммутационных элементов	$KM = \log_S N \frac{N}{S}$	N
R	Число связей между КЭ	$(K - 1)MS = (\log_S N - 1)N$	$ES = NS$
C	Число элементов "И"	$KS^2 = \log_S N NS$	$E(S + 1)^2 = N(S + 1)^2$

В условиях одинаковой связности КЭ МСКС имеет меньшую вероятность $P1_E$ блокировки, чем КЭ ДС ($P2_E$) во всем диапазоне интенсивностей нагрузки λ (рис. 5). С ростом связности уменьшается вероятность $P1_E$ блокировки коммутационного элемента МСКС, а также средняя длина $K1$ маршрута передачи пакета (рис. 6), что вызывает уменьшение вероятности $P1$ блокировки МСКС в целом (рис. 5). Рост связности в ДС вызывает рост вероятности $P2_E$ блокировки КЭ и общая вероятность $P2$ блокировки ДС может уменьшаться только за счет сокращения числа каскадов $K2$.

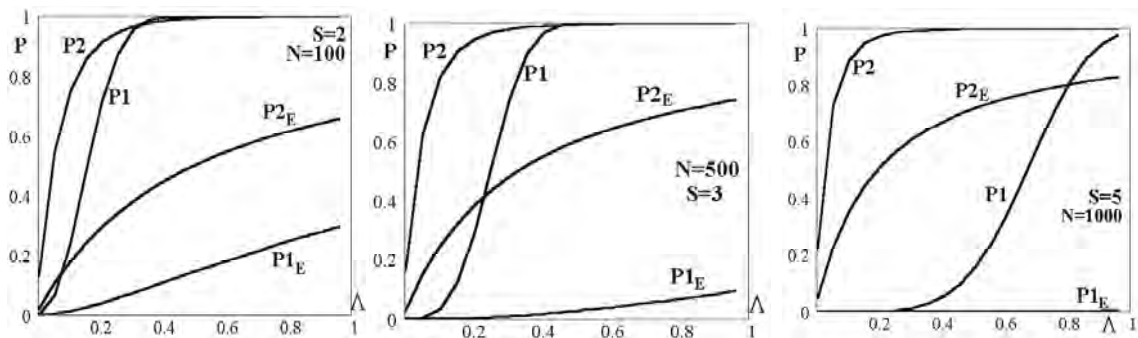


Рис. 5. Зависимости вероятности блокировки МСКС ($P1$) и ДС ($P2$) от нагрузки

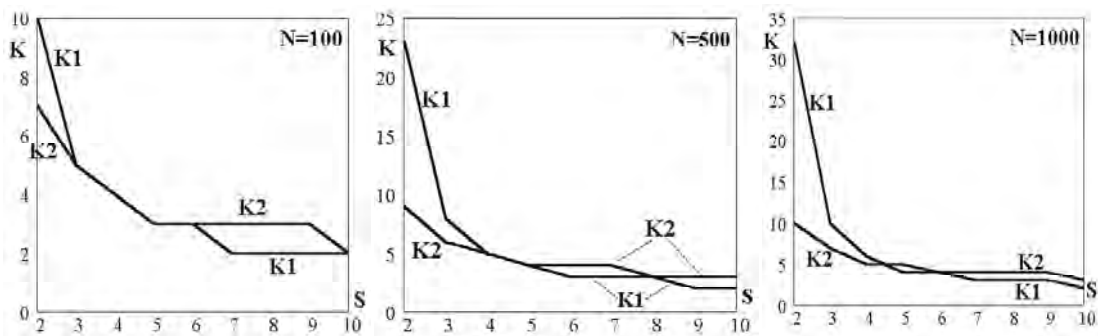


Рис. 6. Зависимость числа каскадов МСКС ($K1$) и ДС ($K2$) от связности

В общем случае рост связности приводит к усложнению алгоритмов самомаршрутизации и увеличению времени обработки заголовков пакетов в КЭ. Увеличивается также сложность коммутационной системы. На рис. 7–9 представлены зависимости числа КЭ, числа элементов "И" и числа связей между КЭ от связности, полученные по соотношениям таблицы. Согласно рисункам, МСКС уступает ДС по числу элементов "И", но превосходит ее по числу связей.

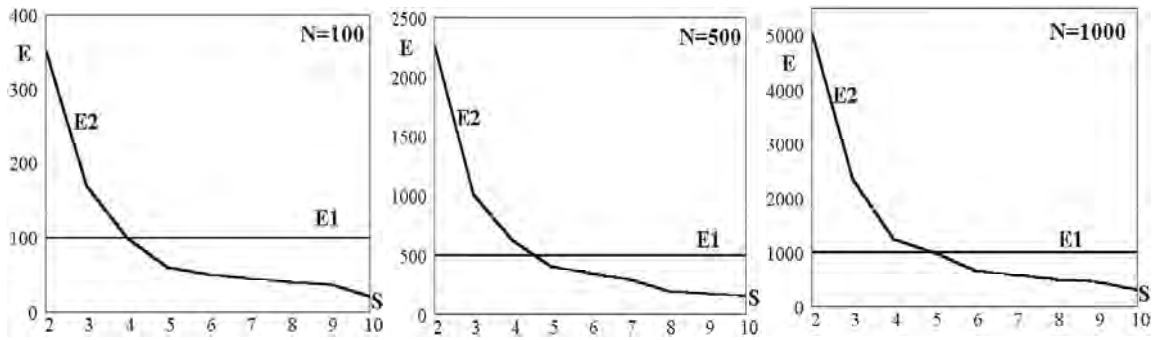


Рис. 7. Зависимость числа КЭ в МСКС (E_1) и ДС (E_2) от связности

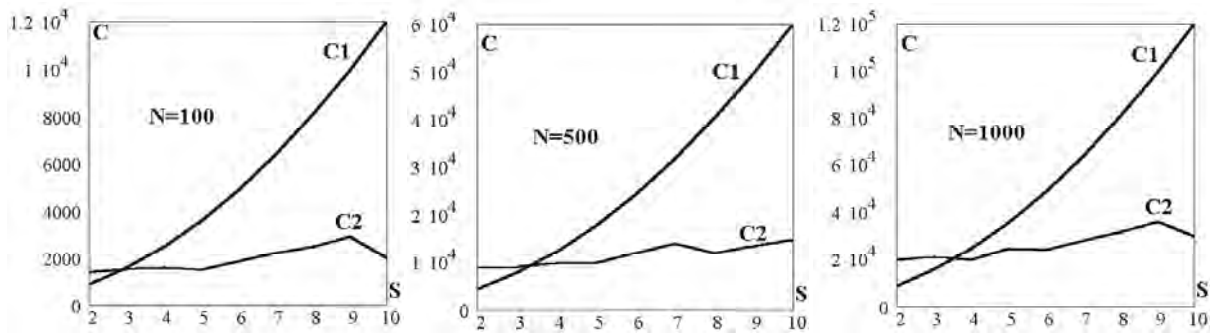


Рис. 8. Зависимость числа элементов "И" в МСКС (C_1) и ДС (C_2) от связности

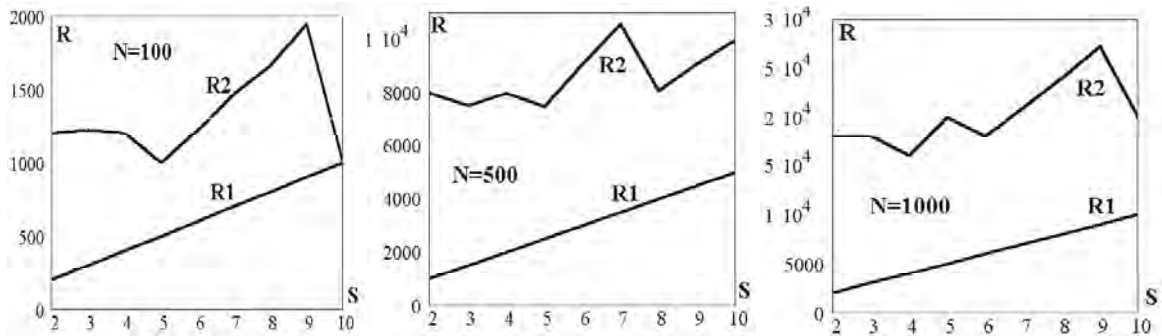


Рис. 9. Зависимость числа промежуточных связей в МСКС (R_1) и ДС (R_2) от связности

На рис. 10–13 представлены характеристики "сложность–блокируемость" коммутационных систем на основе МСКС и ДС в отношении числа КЭ, числа элементов "И", общего числа связей, а также комплексные характеристики "сложность–блокируемость" согласно выражениям (9), (10).

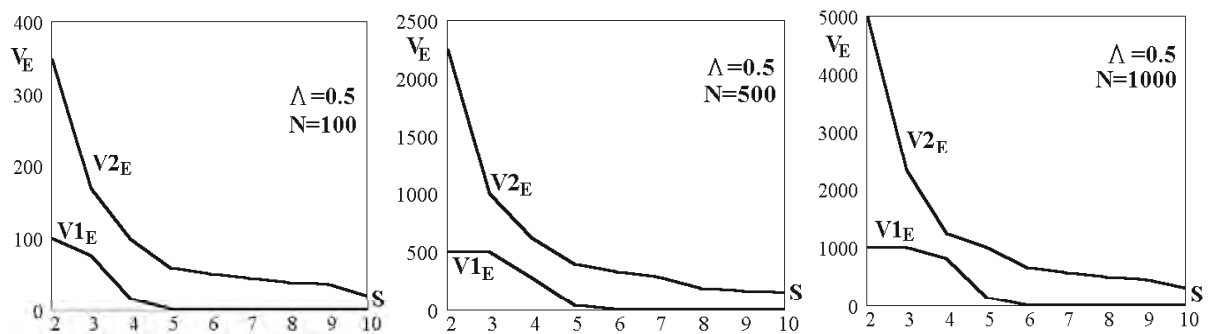


Рис. 10. Характеристики "сложность–блокируемость" в отношении числа КЭ для МСКС (V_{1E}) и ДС (V_{2E})

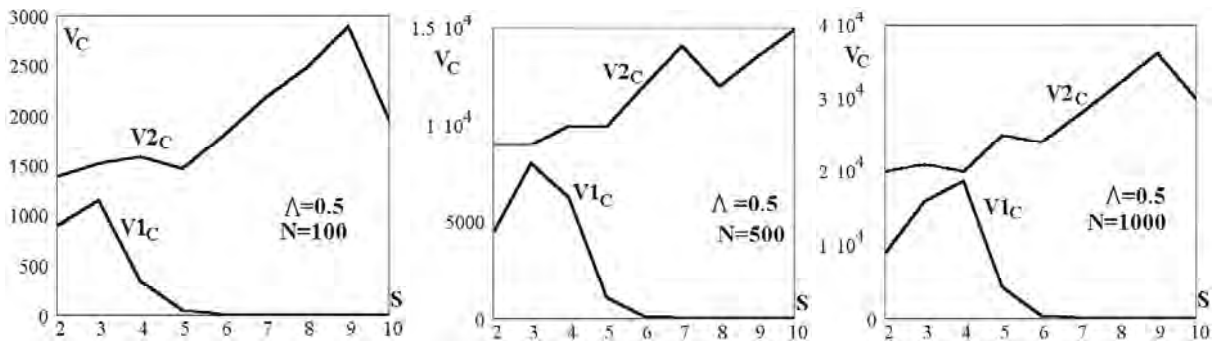


Рис. 11. Характеристики "сложность–блокируемость" в отношении числа элементов "И" для МСКС ($V1_c$) и ДС ($V2_c$)

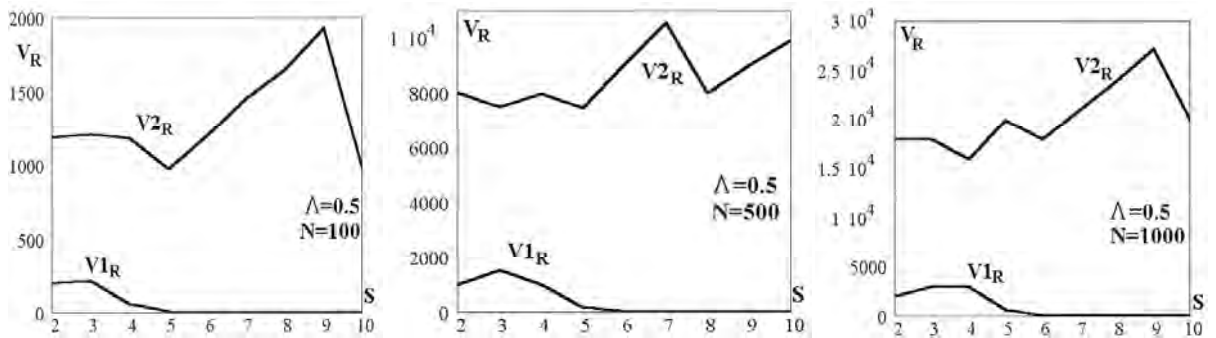


Рис. 12. Характеристики "сложность–блокируемость" в отношении числа связей для МСКС ($V1_r$) и ДС ($V2_r$)

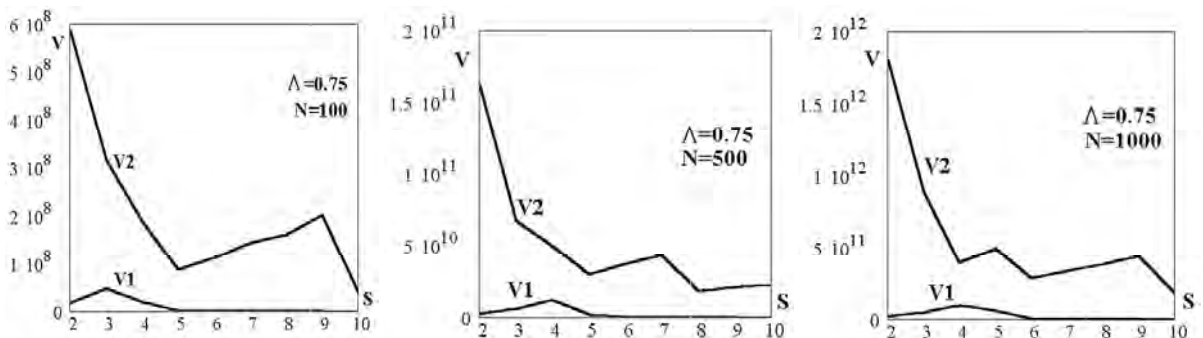


Рис. 13. Комплексные характеристики "сложность–блокируемость" для МСКС ($V1$) и ДС ($V2$)

Представленные характеристики "сложность–блокируемость" демонстрируют преимущества МСКС по сравнению с ДС по всем параметрам во всех диапазонах изменения нагрузки, связности и коммутационной емкости.

Для уменьшения вероятности потерь пакетов в коммутационных системах используется промежуточная буферизация — установка промежуточных накопителей между КЭ в каждой связи. Как в случае МСКС, так и в случае ДС это усложняет реализацию коммутационной системы. Поскольку число связей соответствует числу промежуточных накопителей, рис. 9 отражает также характер зависимости числа буферов от связности. Согласно рис. 9, с ростом связности в случае МСКС сложность реализации коммутационной системы в отношении числа промежуточных накопителей растет медленнее, чем в случае ДС. Кроме того, МСКС требует организации меньшего числа мест ожидания в промежуточных накопителях, чем ДС при одинаковой вероятности потерь.

Использование промежуточных накопителей между каскадами коммутационной системы уменьшает вероятность потерь, однако приводит к росту величины, непостоянству и непредсказуемости задержки передачи пакетов через коммутатор, что отрицательно сказывается на качестве распределения мультимедийного трафика, критичного к задержкам. Единственной

возможностью минимизации величины задержки пакетов в коммутаторе является обеспечение множества промежуточных путей между каждым входом и выходом. В коммутаторах на основе ДС множество промежуточных путей может быть организовано за счет параллельного включения нескольких ДС (модифицированная дельта-система – рис. 14). Вероятность блокировки P_L модифицированной ДС при этом уменьшается в показательной зависимости от числа L слоев ДС, а сложность реализации, оцениваемая по числу E_L коммутационных элементов, числу C_L элементов "И" и числу R_L связей между КЭ, растет пропорционально числу слоев:

$$P_L = P^L, \quad (11)$$

$$E_L = LE, \quad C_L = LC, \quad R_L = LR. \quad (12)$$

На основе МСКС также может быть построена многослойная коммутационная система, имеющая иерархическую структуру. КЭ каждого иерархического уровня, кроме последнего, имеет дополнительный выход, связанный со входом одного из КЭ нижнего по иерархии уровня, и является неблокируемым. Число КЭ на каждом уровне одинаково. В результате вероятность блокировки коммутационной системы определяется нижним по иерархии уровнем, согласно выражениям (3), (7) и (8). Поскольку внешние входы коммутационной системы имеются только в верхнем по иерархии уровне, средняя интенсивность потока поступления нагрузки на входах КЭ нижнего уровня иерархии уменьшается в показательной зависимости от числа уровней и при одинаковой связности МСКС каждого уровня определяется соотношением:

$$\lambda' = \left(\frac{2\lambda}{S+1} \right)^L. \quad (13)$$

Фрагмент структуры иерархической МСКС при $S=2$ представлен на рис. 15. Сложность реализации иерархической коммутационной системы на МСКС, как и в случае модифицированной ДС, растет пропорционально числу L уровней и определяется соотношениями (12).

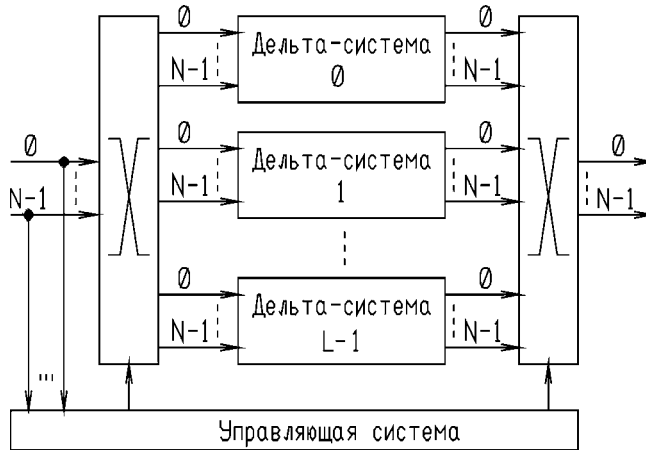


Рис. 14. Структура модифицированной ДС

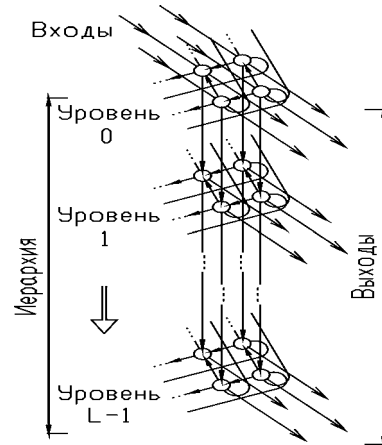


Рис. 15. Структура иерархической МСКС

Для многослойных коммутационных систем на основе МСКС и ДС без промежуточных накопителей на рис. 16 представлены зависимости вероятности блокировки от интенсивности поступления потока нагрузки, а на рис. 17 — характеристики "сложность–блокируемость" для большой коммутационной емкости и высокой интенсивности нагрузки.

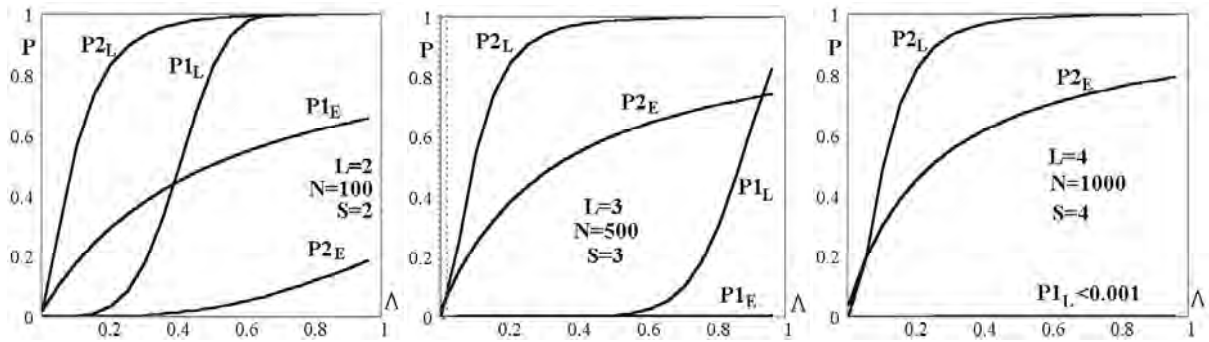


Рис. 16. Зависимости вероятности блокировки многослойных МСКС (P_{1L}) и ДС (P_{2L}) от нагрузки

Из зависимостей рис. 17 следует, что возможно построение иерархической МСКС с низкой вероятностью блокировки в условиях большой емкости и высокой интенсивности нагрузки без использования промежуточных накопителей. При этом иерархическая МСКС значительно превосходит модифицированную ДС по характеристикам "сложность–блокируемость", обеспечивая меньшие значения вероятности потерь пакетов и более экономичную реализацию.

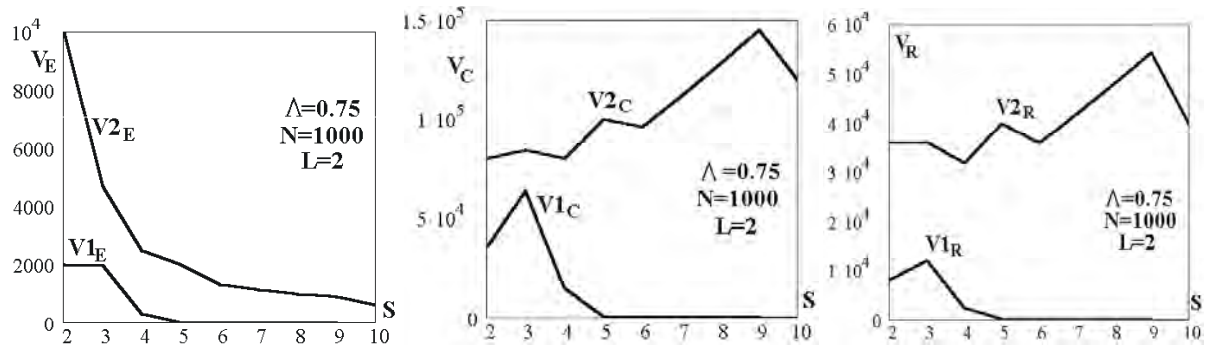


Рис. 17. Характеристики "сложность–блокируемость" для иерархической МСКС (V_{1E} , V_{1C} , V_{1R}) и модифицированной ДС (V_{2E} , V_{2C} , V_{2R})

Заключение

Представленные теоретические и экспериментальные данные показывают, что МСКС обладает рядом важных свойств, существенных для выбора структуры коммутатора мультимедийных данных.

Коммутационный элемент МСКС имеет достаточно низкую вероятность блокировки по сравнению с КЭ других самомаршрутизирующихся коммутационных систем. Вероятность блокировки КЭ в МСКС уменьшается с ростом связности. Это позволяет строить на основе МСКС коммутационные системы с малой вероятностью потерь пакетов даже без промежуточных накопителей. Использование промежуточных накопителей в составе МСКС позволяет обойтись значительно меньшим числом мест ожидания по сравнению с другими вариантами самомаршрутизирующихся коммутационных систем для достижения заданной величины вероятности потерь. Другой возможностью уменьшения вероятности потерь, не исключающей рассмотренную, является построение на основе МСКС многослойной иерархической коммутационной системы, вероятность блокировки в которой, в отличие от других вариантов многослойных коммутационных систем, быстро уменьшается с ростом числа слоев даже при отсутствии промежуточных накопителей.

Иерархическая коммутационная система на основе МСКС позволяет реализовать гибкие алгоритмы самомаршрутизации и динамическое управление мультимедийным трафиком с учетом типа коммутируемых данных и SLA. В частности, распределение трафика по уровням иерархии с различной вероятностью блокировки может быть реализовано достаточно эффективно в зависимости от критичности к задержке и требований SLA.

Связность существенно влияет на эффективность МСКС. Особенности структуры МСКС таковы, что рост связности приводит к уменьшению вероятности блокировки как КЭ, так и МСКС в целом за счет сокращения последовательно соединенных КЭ в промежуточном пути пакета со входа на выход коммутационной системы. При этом уменьшается также задержка пакета в МСКС, что важно при распределении трафика, критичного к задержкам.

Число входов и выходов МСКС совпадает с числом КЭ. Следовательно, МСКС характеризуется меньшей структурной избыточностью по сравнению с другими вариантами построения многозвенных коммутационных систем, в том числе ДС. МСКС уступает другим самомаршрутизирующимся коммутационным системам по числу комбинационных элементов (элементов "И", используемых для построения мультиплексоров в КЭ), но превосходит их по числу промежуточных накопителей и промежуточных связей между КЭ при одинаковой коммутационной емкости и вероятности блокировки. В целом МСКС по сравнению с другими типами самомаршрутизирующихся коммутационных систем имеет более эффективную реализацию, оцениваемую по характеристикам "сложность–блокируемость".

Результаты исследования и моделирования позволяют заключить, что МСКС является эффективным средством для построения коммутаторов мультимедийных данных с высокой пропускной способностью и малой величиной задержки пакетов, стабильно функционирующих в условиях большой емкости и высокой интенсивности поступления потока нагрузки.

ANALYSIS AND ESTIMATE OF PARAMETERS OF MULTIMEDIA SWITCHES BASED ON MULTIPLY CONNECTED RING COMMUTATORS

A.A. BORISKEVICH, V.YU. TSVIATKOU

Abstract

Results of the analysis and choice of multimedia switch structures based on delta-system and a multiply connected ring commutator and their modifications. The estimation of various structure efficiency of switching systems on the basis of "complexity-lockability" characteristics under various values of switching capacity, loading intensity, connectivity and structural redundancy is carried out. The structure of multilayered hierarchical switching system based on multiply connected ring multiplexers and characterizing with high efficiency of realization in a wide range of structural parameter and loading variation. It is shown, that enough small values of probability of losses and delay values of the packages required in distributing the multimedia traffic critical to losses and delays can be achieved due to increasing connectivity and the number of levels in multiply connected ring commutator.

Литература

1. Гургенидзе А.Т., Кореш В.И. Мультисервисные сети и услуги широкополосного доступа. СПб., 2003.
2. Еришов В.А., Кузнецов Н.А.. Мультисервисные телекоммуникационные сети. М., 2003.
3. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: Ч. II. М., 1992.
4. Борискевич А.А., Цветков В.Ю. // Современные средства связи: материалы конференции. Изв. Белорус. инж. акад. 2004. №2 (14)/1. С. 34-36.
5. Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д.А. Поспелова. М., 1990.
6. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы. М., 1999.
7. Шпота С.Д. и др. Цифровое коммутационное поле. А.с. № 12/5/95.