

НЕБЛОКИРУЕМЫЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ ДВУХКАСКАДНЫЕ ДУАЛЬНЫЕ ФОТОННЫЕ КОММУТАТОРЫ

Е.А. Барабанова, К.А. Вытовтов, В.С. Подлазов

Аннотация. Продолжено развитие теории построения принципиально нового класса системных сетей – неблокируемых дуальных фотонных сетей со статической самомаршрутизацией. Данные сети обладают масштабируемостью, высоким быстродействием, свойственным фотонным системам, и сложностью, сопоставимой со сложностью полного коммутатора. Использование расширенного схемного базиса, состоящего из дуальных фотонных коммутаторов и отдельных фотонных мультиплексоров и демultipлексоров, позволяет добиться балансировки соотношений масштабируемость/быстродействие и сложность/быстродействие. В работе предложен метод построения двухкаскадной отказоустойчивой дуальной сети с указанными свойствами на основе сетей с топологией квазиполного графа и квазиполного орграфа и метода инвариантного расширения с внутренним распараллеливанием.

Ключевые слова: фотонный коммутатор, дуальный коммутатор, фотонные мультиплексоры и демultipлексоры, многокаскадный коммутатор, бесконфликтная самомаршрутизация, неблокируемый коммутатор, статическая самомаршрутизация, квазиполный орграф, квазиполный граф, коммутационные свойства, прямые каналы, масштабируемость, быстродействие и отказоустойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–4] предложена методика построения неблокируемых фотонных коммутаторов со статической самомаршрутизацией для оптических суперкомпьютерных систем и систем связи.

В данной работе ставится и решается задача построения неблокируемых самомаршрутизируемых фотонных коммутаторов с $(\sigma - 1)$ -канальной отказоустойчивостью. Она обеспечивается посредством замены топологии дуального квазиполного орграфа [1–3] на топологию дуального квазиполного графа, допускающую размен общего числа каналов на число разных каналов между абонентами. Эта задача решается так же, посредством применения развитого ранее [4] метода внутреннего распараллеливания.

Неблокируемые сети со статической самомаршрутизацией составляют принципиально новый класс системных сетей, достигающих указанных свойств посредством применения нового типа неблокируемых дуальных коммутаторов и метода инвариантного расширения сетей на основе сетей с топологией квазиполных орграфов и графов [4, 5].

Это утверждение базируется на том факте, что до настоящего времени таких сетей с широкой масштабируемостью и приемлемой сложностью построено не было. В настоящее время в литературе широко представлены [6–13] системные сети со структурой толстого дерева (в частности, перестраиваемые сети Клоза), со структурой обобщенного гиперкуба, со структурой многомерного тора и сети с иерархией полных графов или орграфов.

Сети со структурой толстого дерева являются перестраиваемыми сетями [6, 7], в которых бесконфликтная передача осуществляется только по заранее составленным расписаниям для конкретных перестановок пакетов. Для произвольных перестановок эти сети оказываются блокируемыми, и в них перестановки осуществляются за несколько скачков между узлами сети. Сети со структурой обобщенного гиперкуба не являются даже перестраиваемыми [8, 9]. Их можно сделать таковыми посредством увеличения числа каналов в некоторых измерениях. Сети со структурой многомерного тора для произвольных перестановок вообще не имеют возможности передавать пакеты по прямым каналам [10, 11]. Они реализуют перестановки за несколько скачков между узлами сети. Аналогич-



ными свойствами обладают и сети со структурой иерархии полных графов или орграфов [12, 13].

В работах [1–4] методика построения неблокируемых фотонных коммутаторов со статической самомаршрутизацией основана на четырех базовых положениях.

Использование четырехканального коммутатора новой структуры, который является дуальным по способу разрешения конфликтов. Он совмещает шинный способ (разведение конфликтующих сигналов по разным тактам в одном канале) и коммутаторный способ (разведение конфликтующих сигналов по разным каналам).

Допущение о передаче сигнальной и управляющей информации для коммутаторов параллельно на разных частотах для каждого разряда данных. Это допущение позволяет снять проблему синхронизации сигналов разных каналов.

Способ каскадирования коммутаторов, по которому I -й канал J -го коммутатора одного каскада подсоединяется к J -му каналу I -го коммутатора в следующем каскаде. В этом способе с обменными связями предыдущий и следующий каскады должны состоять из одинакового числа коммутаторов с одинаковым числом каналов каждый. Этот способ позволяет создавать многоканальные коммутаторы с малым числом каскадов.

Балансировка быстродействия и сложности многокаскадного коммутатора основывается на применении метода инвариантного расширения системных сетей [5], сохраняющего неблокируемость и быстродействие коммутатора при увеличении числа его каналов. Это метод основывается на использовании расширенной схемной базы, состоящей из коммутаторов $p \times p$ на p каналов и пар мультиплексоров $M_p 1 \times p$ и демультимплексоров $D_p p \times 1$ ($p \geq 2$).

В § 1 представлены работы по фотонике, близкие к рассматриваемой задаче [14–23]. В § 2 представлена методика построения неблокируемых фотонных коммутаторов, которой авторы пользовались в предыдущих работах [1–4]. В § 3 представлен коммутатор с топологией дуального квазиполного графа как основы построения неблокируемых самомаршрутизируемых коммутаторов с канальной отказоустойчивостью. В § 4 строятся двухкаскадные неблокируемые самомаршрутизируемые коммутаторы с одноканальной и двухканальной отказоустойчивостью и оцениваются их характеристики по быстродействию и сложности. В заключении суммируются полученные результаты и намечаются возможности их развития и обобщения для построения четырехкаскадных и 8-каскадных неблокируемых отказоустойчивых коммутаторов широкой масштабируемости.

1. ОБЗОР РЕЛЕВАНТНЫХ РАБОТ ПО ФОТОНИКЕ

В настоящее время одним из перспективных направлений развития высокопроизводительных суперкомпьютеров является использование фотонных технологий [14, 15]. При этом большое внимание уделяется разработке фотонных коммутаторов, позволяющих существенно повысить скорость передачи и обработки информации [16–23]. В работе [16] рассмотрены фотонные коммутаторы, для построения которых использовались такие известные топологии, как схемы Клоза, Бенеша, матричный коммутатор, Dragonfly и т. д. Одним из недостатков данных схем является внешнее электронное управление, которое, с одной стороны, позволяет реализовать неблокируемую коммутацию, но с другой стороны, ограничивает быстродействие оптических схем в среднем до нескольких десятков наносекунд [17, 18]. Так, например, в работе [23] представлен матричный коммутатор с внешним управлением размерностью 240×240 , выполненный на основе МЭМС-технологии, быстродействие которого составило 400 нс. Другой проблемой при реализации оптических коммутаторов является необходимость использования оптических буферных устройств [18]. В работе [22] предлагается метод передачи и обработки информации, позволяющий уменьшить размер оптического буфера в 4,2 раза и повысить быстродействие в 2,6 раза. В работе [18] предлагается новый принцип оптической коммутации, названный коммутацией сегментов. Он отличается от коммутации каналов тем, что в процессе установления соединения заранее резервируется не весь маршрут от отправителя к получателю, а его более мелкие сегменты. Это позволяет повысить производительность сети и уменьшить число конфликтов.

В работах [14–23] представлены отдельные компоненты фотонных сетей, но нет методики объединения их в сети с заданными свойствами. Напротив, в работах [1–4] дается методика построения неблокируемых фотонных коммутаторов со статической самомаршрутизацией.

2. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ НЕБЛОКИРУЕМЫХ ФОТОННЫХ КОММУТАТОРОВ

В работах [1–4] одна из схем однокристалльного дуального коммутатора 4×4 имеет вид двухкаскадной схемы из четырех демультимплексоров и четырех мультиплексоров с обратными связями через линии задержки. Каскады коммутатора соединены обменными связями. Если измерять сложность мультиплексоров M_4 и демультимплексоров D_4

плексоров Д4 в числе точек коммутации как равную четырем, то коммутационная сложность коммутатора задается как $S_1 = 32$. Комбинация из двух управляющих частот однозначно определяет режим демультиплексора, в котором информационный сигнал может быть направлен на один из четырех выходов.

Сигналы с выходов демультиплексора поступают на входы мультиплексора. Один из них пропускается на выход, а остальные возвращаются на свои линии задержки ЛЗ- δ длительностью в δ тактов (сигналов). Обратные связи через ЛЗ- δ придают коммутатору функцию динамической задержки сигналов, что требует увеличения периода передачи сигналов.

Дуальный коммутатор ДК4 обеспечивает неблокируемость при статической самомаршрутизации при соответствующем выборе длины линии задержки δ . Значение δ зависит от номера каскада, в котором используется коммутатор ДК4.

В первом каскаде $\delta = 1$. Пусть на входы коммутатора ДК4 одновременно поступают четыре сигнала длительностью T_0 , принимаемой за один такт. Ввиду динамической задержки сигналов на его выходах может возникнуть один из четырех вариантов размещения сигналов: по одному на каждом выходе, по два сигнала подряд на двух выходах, один и три сигнала подряд на двух выходах и четыре сигнала подряд на одном выходе. В результате коммутатор ДК4 окажется неблокируемым на любом входном трафике при длительности периода T_1 информационных сигналов в четыре такта. Подчеркиванием обозначаются значения, полученные в работах [1–3].

Таким образом неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор ДК4 имеет такие характеристики: период сигналов $T_1 = 4 = N_1$ тактов, число каналов $N_1 = 4$ и коммутационную сложность $S_1 = 32 = N_1^{5/2}$.

В работах [1–3] был рассмотрен двухкаскадный коммутатор K_216 16×16 с обменными связями, состоящий из четырех коммутаторов ДК4 в каждом каскаде. В первом каскаде используются линии задержки ЛЗ-1, а во втором – ЛЗ-0, т. е. линии задержки не используются. На произвольной перестановке пакетов K_216 оказался неблокируемым самомаршрутизируемым коммутатором с такими характеристиками: число каналов $N_2 = 16$, период сигналов $T_2 = 4 = N_2^{1/2}$ тактов и коммутационная сложность $S_2 = 2 \cdot 4 \cdot 32 = 256 = N_2^2$.

В работах [1–3] был рассмотрен четырехкаскадный коммутатор 256×256 K_4256 с обменными связями, состоящий из 16 коммутаторов K_216 в каждом каскаде. Он состоит из четырех каскадов

коммутаторов ДК4. В первом каскаде используются линии задержки ЛЗ-1, во втором – ЛЗ-4, в третьем – ЛЗ-15 и в четвертом – ЛЗ-0. На произвольной перестановке пакетов K_4256 оказался неблокируемым самомаршрутизируемым коммутатором с такими характеристиками: период сигналов $T_4 = 49 \approx 3N_4^{1/2}$ тактов, число каналов $N_4 = 256$ и коммутационная сложность $S_4 = 2 \cdot 16 \cdot 256 = 8192 = N_4^{1,625}$. Отметим здесь большой период разрядов (низкое быстродействие) и малую сложность коммутатора.

В работах [1–3] была предложена балансировка соотношения быстродействие/сложность с помощью инвариантного расширения неблокируемых коммутаторов с малым периодом. В частности, коммутатор K_216 расширялся посредством параллельного использования его нескольких копий и внешних мультиплексоров М4 и демультиплексоров Д4. Этот метод увеличения числа каналов можно называть методом внешнего распараллеливания неблокируемой сети. В результате его применения был построен неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_364 , состоящий из 16 коммутаторов K_216 и 64 демультиплексоров Д4 и мультиплексоров М4 и имеющий следующие характеристики: число каналов $N_3 = 64$, период сигналов $T_3 = 4 = N_3^{1/3}$ тактов и коммутационную сложность $S_3 = 16 \cdot 256 + 4 \cdot 128 = 4608 = N_3^{2,028}$.

В работе [4] неблокируемый коммутатор с топологией квазиполного орграфа использовался не только для расширения двухкаскадных коммутаторов, но и сразу для их построения. В результате удалось построить неблокируемые коммутаторы с большим быстродействием (меньшим периодом сигналов) и с большим числом каналов, чем в работах [1–3].

Коммутатор с топологией квазиполного орграфа строится из дуальных коммутаторов $p \times p$ (ДК p) совместно с демультиплексорами $1 \times p$ (Д p) и мультиплексорами $p \times 1$ (М p). Неблокируемый коммутатор КП N_1 на $N_1 = p^2$ каналов состоит из N_1 коммутаторов ДК p , демультиплексоров Д p и мультиплексоров М p . Его схемы для $p = 2$ и $p = 4$ представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Получаемые далее в настоящей статье значения приводятся без подчеркивания.

Коммутационная сложность коммутатора КП N_1 задается как $S_1 = 2pN_1 + 2p^2N_1 = 2p^3(p+1)$, а канальная сложность (число каналов без внутренних каналов ДК p) – как $L_1 = 2pN_1 = 2p^3$. В табл. 1 даются их значения, выраженные показательной зависимостью через число каналов. В дальнейшем задаваемую таким образом сложность будем называть показательной сложностью.

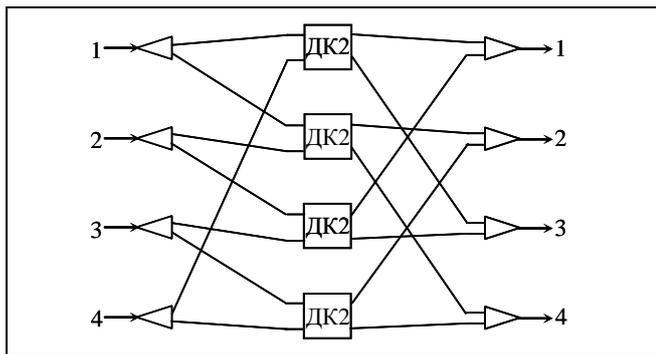


Рис. 1. Дуальный коммутатор КП4 с топологией квазиполного графа. Квадраты задают коммутаторы ДК2, а треугольники – демультиплексоры Д2 и мультиплексоры М2

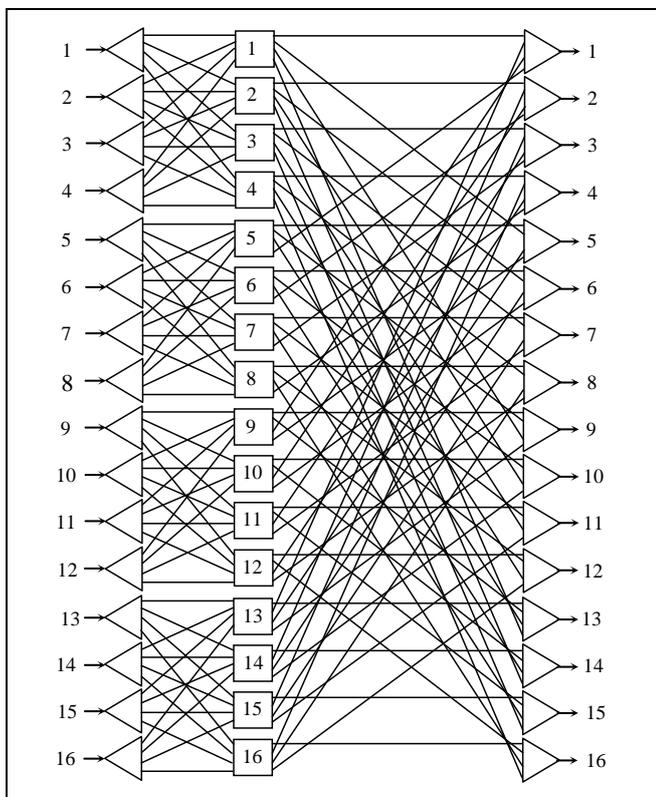


Рис. 2. Дуальный коммутатор КП16 с топологией квазиполного графа. Квадраты задают коммутаторы ДК4, а треугольники – демультиплексоры Д4 и мультиплексоры М4

кадов по четыре коммутатора КП4 в каждом каскаде. К сожалению, сеть C_{216} является блокируемой сетью, так как реализация произвольной перестановки на сети C_{216} не сводится к реализации перестановок на коммутаторах КП4 первого и второго каскада. Конфликты сигналов могут происходить на каскаде мультиплексоров М2, выделенных серой заливкой (см. рис. 5 в работе [5]). Конфликтовать могут сигналы в одинаковых тактах на разных входах мультиплексора.

Методом инвариантного внутреннего распараллеливания [4] сеть C_{216} преобразуется в неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_{216} с периодом сигналов $T_2 = 2$ такта.

При любом $p > 2$ аналогичным образом можно построить неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_{2N_2} с числом каналов $N_2 = p^4$ и периодом разрядов $T_2 = p$. Коммутационная сложность коммутатора K_{2N_2} задается по построению рекуррентной формулой $S_2 = N_1S_1 + pN_1S_1$, а канальная – рекуррентной формулой $L_2 = N_1L_1 + pN_1L_1$. Численные значения характеристик коммутатора K_{2N_2} представлены в табл. 2.

Здесь важно отметить, что коммутационная и канальная сложности коммутатора K_{2N_2} существенно меньше, чем у коммутатора KPN_1 (см. табл. 1). Это означает, что метод внутреннего распараллеливания открывает возможность уменьшения показательной сложности двухкаскадного коммутатора по сравнению со сложностью исходного коммутатора KPN_1 .

В работе [4] был применен также метод инвариантного расширения с внешним распараллеливанием неблокируемых коммутаторов посредством использования дополнительных составных мультиплексоров Md и демультиплексоров Dd с $d = p^\alpha$ ($1 \leq \alpha \leq 4$). Он позволил создать набор неблокируемых самомаршрутизируемых коммутаторов широчайшей масштабируемости.

Таким образом, в работах [1–4] рассмотрены различные подходы к построению неблокируемых фотонных коммутаторов широкой масштабируемости, но при этом не затрагивался вопрос отказоустойчивости таких сетей. Более того, учитывая, что в фотонных коммутаторах [1–4] между любой парой «вход – выход» существует только один физический путь передачи информации, то разработка новых коммутационных схем с большим числом таких каналов позволит повысить их отказоустойчивость и представляет собой актуальную задачу.

Таблица 1

Характеристики коммутаторов КП N_1

p	2	4	6	8
N_1	4	16	36	64
S_1	$N_1^{2,79}$	$N_1^{2,33}$	$N_1^{2,24}$	$N_1^{2,19}$
L_1	N_1^2	$N_1^{1,75}$	$N_1^{1,69}$	$N_1^{1,67}$

Из неблокируемых дуальных коммутаторов КП4 можно построить двухкаскадную сеть C_{216} с обменными связями [5]. Она состоит из двух кас-

Таблица 2

 Характеристики коммутаторов K_2N_2

p	$N_2 = p^4$	$T_2 = p$	S_2	L_2
2	16	2	$576 = N_2^{2,29}$	$224 = N_2^{1,95}$
3	81	3	$7\,776 = N_2^{2,04}$	$2\,187 = N_2^{1,75}$
4	256	4	$51\,200 = N_2^{1,96}$	$11\,264 = N_2^{1,68}$
5	625	5	$225\,000 = N_2^{1,91}$	$40\,625 = N_2^{1,65}$
6	1296	6	$762\,048 = N_2^{1,89}$	$116\,640 = N_2^{1,63}$
7	2401	7	$2\,151\,296 = N_2^{1,87}$	$285\,719 = N_2^{1,61}$
8	4096	8	$5\,308\,416 = N_2^{1,86}$	$622\,592 = N_2^{1,60}$

3. НЕБЛОКИРУЕМЫЙ САМОМАРШРУТИЗИРУЕМЫЙ КОММУТАТОР С ТОПОЛОГИЕЙ КВАЗИПОЛНОГО ГРАФА

На базе дуальных коммутаторов DKp совместно с демультиплексорами Dp и мультиплексорами Mp можно построить неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор на N_1 каналов с топологией квазиполного графа – дуальный коммутатор $KПГ(N_1, p, \sigma)$, в котором $N_1 = p(p - 1)/\sigma + 1$ и σ задает число дуплексных каналов между любыми двумя абонентами через разные коммутатор DKp .

Коммутатор $KПГ(N, p, \sigma)$ изоморфен такому математическому объекту, как неполная уравновешенная симметричная блок-схема $B(N, p, \sigma)$ [24]. Она содержит N блоков и N элементов, которые размещены по блокам так, что каждый блок содержит точно p различных элементов, а каждый элемент входит точно в p различных блоков, и каждая пара элементов входит точно в σ блоков. При этом блок-схема $B(N, p, \sigma)$ задает максимальное значение N при заданных значениях p и σ .

В коммутаторном представлении блоки интерпретируются как коммутаторы DKp , элементы – как абоненты степени p (с p дуплексными портами), а вхождение элемента в блок – как соединение дуплексным каналом каждого коммутатора DKp с каждым абонентом. При этом однопортовый абонент подсоединяется к разным коммутаторам DKp через пару демультиплексоров Dp и мультиплексоров Mp . На рис. 3 дана схема коммутатора $KПГ(7, 4, 2)$ с дуплексными каналами и совмещенной парой демультиплексоров Dp и мультиплексоров Mp в одном разветвителе дуплексных каналов (хабе).

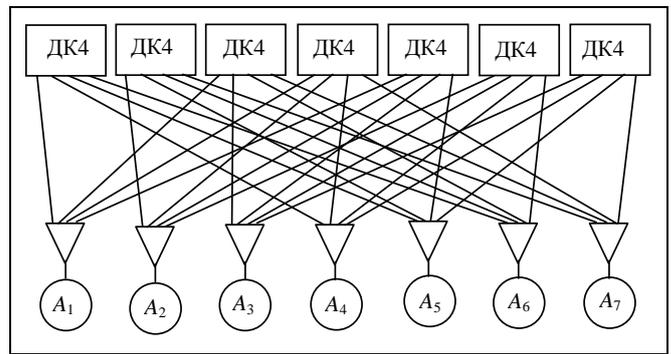


Рис. 3. Схема неблокируемой сети на базе коммутатора $KПГ(7, 4, 2)$ с двумя разными каналами между любыми абонентами

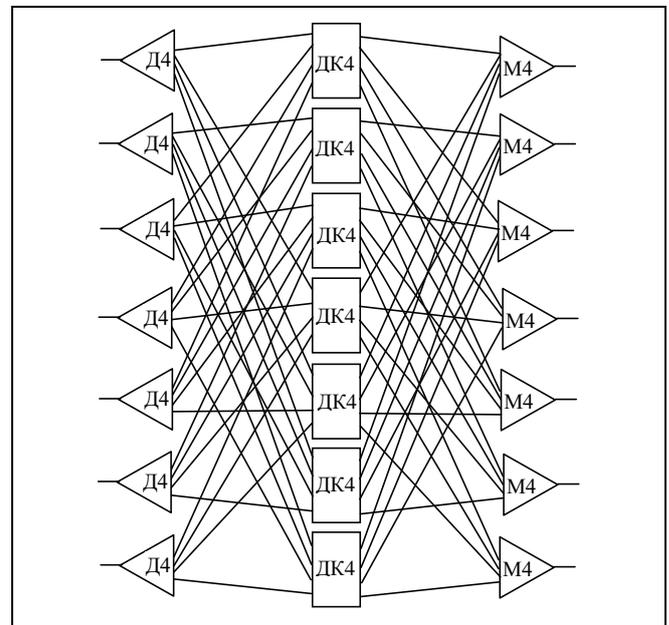


Рис. 4. Схема неблокируемого самомаршрутизируемого коммутатора $KПГ(7, 4, 2)$ с двумя разными путями между любыми входными демультиплексорами $D4$ и выходными мультиплексорами $M4$



Таблица 4

Коммутатор КПП(N, p, σ) и однорасширенные блок-схемы коммутаторов КПП(N*, p, σ/σ + 1)

	p									
σ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7	11	21	31	<u>39</u>	57	73	91	<u>95</u>	133
2	4	7	11	<u>15</u>	<u>21</u>	<u>27</u>	37	<u>42</u>	<u>51</u>	<u>63</u>
3	3	5	<u>7</u>	11	15	<u>19</u>	<u>23</u>	<u>29</u>	<u>36</u>	<u>43</u>

Для решения задачи построения многоканальной неблокируемой сети коммутатор КПП(N, p, σ) используется в формате с разделением каждого дуплексного канала на два симплексных – входной от демультиплексоров Dp и выходной от мультиплексоров Mp. На рис. 4 приведена схема коммутатора КПП(7, 4, 2) в указанном формате. При этом (σ – 1)-канальная отказоустойчивость понимается как наличие σ разных путей через разные коммутаторы ДКp между входными демультиплексорами Dp и выходными мультиплексорами Mp.

В общем случае более сложной сети, построенной на базе коммутатора КПП(N, p, σ), ее (σ – 1)-канальная отказоустойчивость трактуется как наличие σ разных путей через разные части сети между входными демультиплексорами Dp и выходными мультиплексорами Mp.

К сожалению, квазиполные графы существуют не для всех значений параметров p и σ, и для каждой пары значений p и σ их приходится строить путем перебора. В табл. 3 приводятся значения N квазиполных графов при малых значениях этих параметров. Пустые клетки отмечают графы, которые не существуют по определению. Прочерки в клетках отмечают графы, которые не могут существовать согласно теории, а перечеркнутые значения отмечают графы, которые еще не построены.

Таблица 3

Параметры коммутатора КПП(N, p, σ)

	p									
σ	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7	11	21	31	–	57	73	91	111	133
2	4	7	11	16	–	–	37	–	56	–
3	3	5		11	15		25	31	45	

Необходимость построения отказоустойчивых сетей требует некоторого эффективного заполнения пустых клеток в табл. 3. Для этого в работе [25] были построены однорасширенные коммутаторы КПП(N*, p, σ/σ + 1), в которых малая часть абонентов связаны σ + 1 разными путями, а остальные – точно σ разными путями. Значения N и N* числа узлов в вышеупомянутых блок-схемах приводятся в табл. 4, где последние выделяются подчеркиванием.

Коммутаторы КПП(N1, p, σ) имеют один слой выходных мультиплексоров Mp общим числом V1 = (p + 1)N1.

4. НЕБЛОКИРУЕМЫЙ САМОМАРШРУТИЗИРУЕМЫЙ ДВУХКАСКАДНЫЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЙ КОММУТАТОР

Введем понятие p-разбиения пакетов, передаваемых через некоторое сечение сети, при перестановке. Все пакеты разделены на группы переменного состава, содержащие не более p пакетов в каждой. При обычной перестановке пакетов на входе и выходе сети имеет место 1-разбиение. Назовем прямой p-перестановкой вариант передачи, при котором на входе сети имеет место 1-разбиение, а на некотором сечении – p-разбиение. Назовем обратной p-перестановкой вариант передачи, при котором на входе сети имеет место p-разбиение, а на заданном сечении – 1-разбиение.

Для дуального коммутатора КПП(N1, p, σ) указанное сечение проводится через входы выходных мультиплексоров и называется выходным сечением. По свойству дуального коммутатора ДКp на выходном сечении дуального коммутатора КПП(N1, p, σ) при любом трафике имеет место p-разбиение. В частности, при любой перестановке в дуальном коммутаторе КПП(N1, p, σ) имеет место прямая p-перестановка.

Лемма 1. Дуальный коммутатор КПП(N1, p, σ) является неблокируемым при любой обратной p-перестановке, сохраняя при этом (σ – 1)-канальную отказоустойчивость.

Доказательство. Второе утверждение опирается на неблокируемость коммутатора КПП(N1, p, σ) на произвольной 1-перестановке и того факта, что обратная p-перестановка состоит из разреженных 1-перестановок, разведенных по разным тактам. При этом число разных путей между любым источником и приемником сохраняется в каждой такой перестановке. ♦

Дальнейшее построение многоканальных отказоустойчивых сетей будем осуществлять на при-

мере коммутатора ДК2 и минимального коммутатора с одноканальной отказоустойчивостью КПП(2, 2, 2) (рис. 5). Сначала строится блокируемая двухкаскадная четырехканальная сеть C_24 с обменными связями (рис. 6). Она оказывается блокируемой сетью из-за возможных конфликтов в мультиплексорах М2 первого каскада, выделенных заливкой. На них же нарушается и одноканальная отказоустойчивость. Сеть C_24 посредством использования двух копий второго каскада и применения метода внутреннего распараллеливания преобразуется в неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_24 (рис. 7).

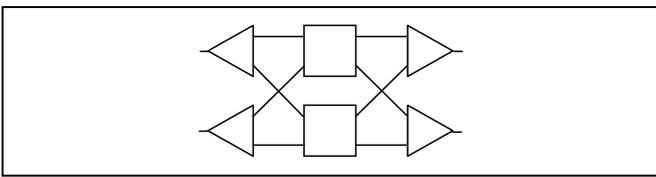


Рис. 5. Двухканальный неблокируемый коммутатор КПП(2, 2, 2) с $T_2 = 2$ и одноканальной отказоустойчивостью

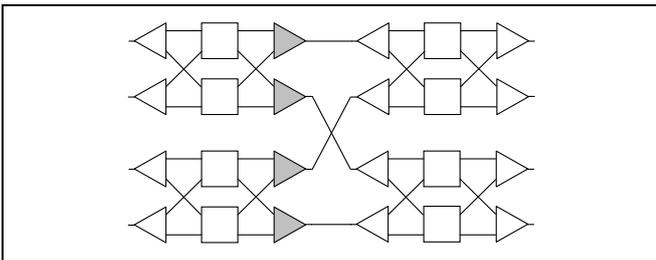


Рис. 6. Двухкаскадная сеть C_24 с обменными связями

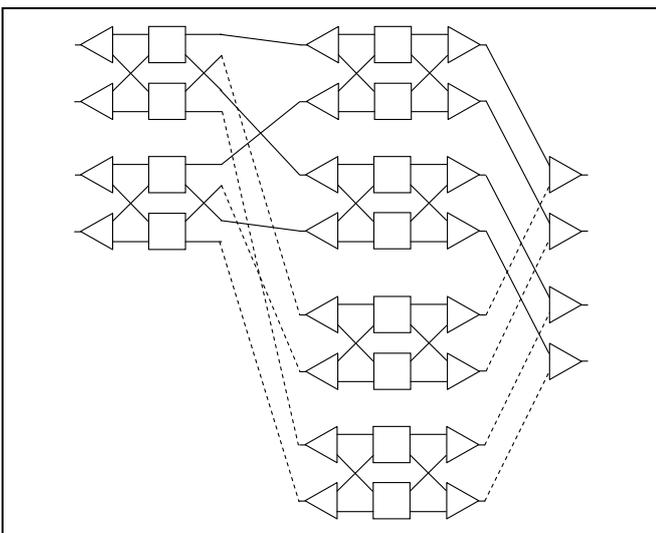


Рис. 7. Четырехканальный неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_24 с одноканальной отказоустойчивостью

Это преобразование осуществляется посредством удаления всех мультиплексоров М2 из первого каскада и разведения их входных каналов по двум копиям второго каскада. Вырезанные мультиплексоры М2 объединяют одноименные выходные каналы копий второго каскада и образуют схему первого измерения. На входах составляющих ее коммутаторов КПП(2, 2, 2) имеют место разреженные прямые p -перестановки с непересекающимися входами-выходами. По лемме 1 они реализуются бесконфликтно. При этом любые два пути в первом каскаде разводятся по двум копиям второго каскада, что сохраняет одноканальную отказоустойчивость.

Как следствие коммутатор K_24 оказывается неблокируемым коммутатором со статической самомаршрутизацией. Он обладает одноканальной отказоустойчивостью вследствие того, что все пути между входными демультиплексорами Д2 и выходными мультиплексорами М2 проходят по разным копиям второго каскада сети C_24 в схеме первого измерения, так как $p = \sigma = 2$.

В общем случае $p > 2$ и $\sigma = 2$ используются коммутаторы ДК p и КПП($N_1, p, 2$). Минимальным нетривиальным дуальным графом коммутаторов КПП($N_1, p, 2$) является дуальный коммутатор КПП(4, 3, 2) (рис. 8).

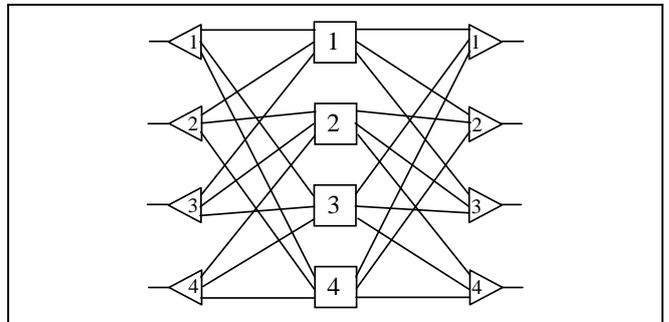


Рис. 8. Неблокируемый самомаршрутизируемый дуальный коммутатор КПП(4, 3, 2) с одноканальной отказоустойчивостью

Аналогичным образом строится двухкаскадная сеть C_2N_2 с обменными связями и $N_2 = N_1^2$. Затем она посредством внутреннего распараллеливания по p копиям второго каскада, которые образуют схему первого измерения, преобразуется в неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_2N_2 , который обладает одноканальной отказоустойчивостью, так как имеет p путей в схеме первого измерения и $p \geq 2$. Для $p = 3$ коммутатор K_216 представлен на рис. 9.

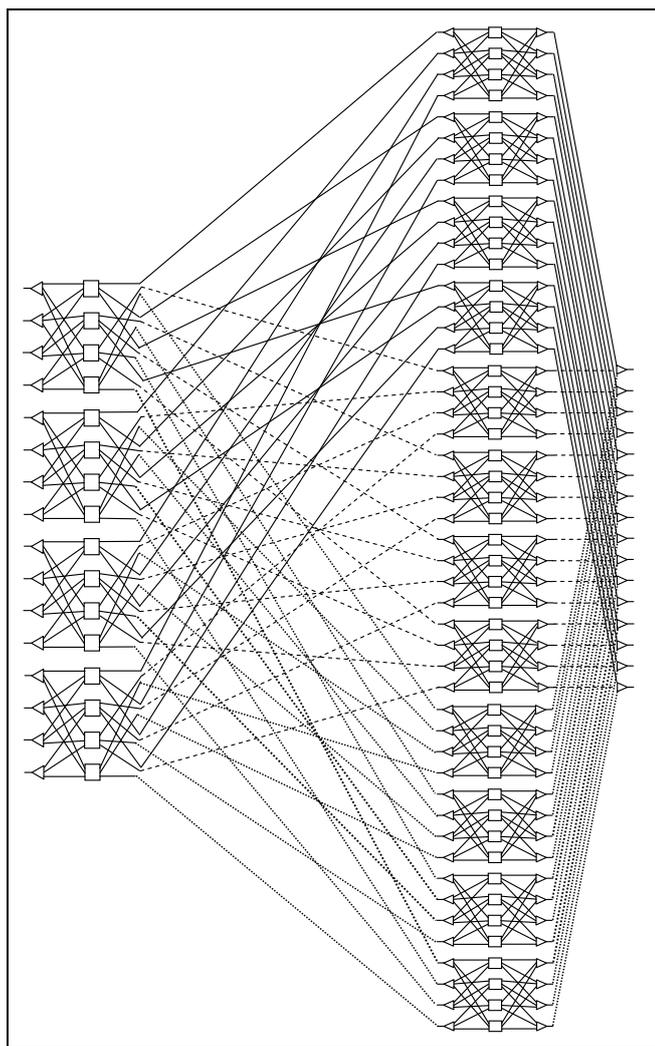


Рис. 9. Неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_2N_2 с одноканальной отказоустойчивостью

Коммутационная сложность дуального коммутатора $p \times p$ определяется по формуле $S_0 = 2p^2$. Тогда выражение для коммутационной сложности коммутатора $KПГ(N_1, p, \sigma)$ имеет вид $S_1 = N_1S_0 + 2pN_1$. Выражение для канальной сложности коммутатора $KПГ(N_1, p, \sigma)$ имеет вид $L_1 = 2pN_1$.

Учитывая, что в коммутаторе K_2N_2 используются все мультиплексоры коммутаторов $KПГ(N_1, p, \sigma)$ и не добавляется новых, а их входные и выходные каналы только перенаправляются, то можно сделать такой вывод: коммутационная сложность коммутатора K_2N_2 задается по построению как $S_2 = N_1S_1 + pN_1S_1$, а канальная – как $L_2 = N_1L_1 + pN_1L_1$. Численные значения характеристик коммутаторов K_2N_2 для разных σ представлены в табл. 5 и 6.

Сравним сложность коммутатора K_2N_2 с одноканальной отказоустойчивостью со сложностью коммутатора, имеющего топологию полного графа и дублированные каналы, например, при $p = 4$ ($N_2 = 49$). Для последнего коммутационная сложность оценивается как $S_2 = N_2^{2,35}$, а канальная – как $L_2 = N_2^{2,17}$. Коммутационные сложности сопоставимы, а канальная сложность у коммутатора K_2N_2 существенно меньше. При этом коммутатор с топологией полного графа имеет в четыре раза меньший период разрядов. Однако окончательные выводы делать еще рано.

В общем случае схема первого измерения определяется так: p копий второго каскада сети C_2N_2 с подсоединенными к ним входами вырезанных мультиплексоров M_p и с выходами, объединенными этими мультиплексорами M_p , образуют схему первого измерения. Коммутатор K_2N_2 содержит только одну схему первого измерения, выходы которой представляют собой выходы самого коммутатора.

Для обеспечения двухканальной отказоустойчивости необходимо использовать графы $KПГ(N_1, p, 3)$. Минимальным графом $KПГ(N_1, p, 3)$ является $KПГ(3, 3, 3)$, а минимальным нетривиальным графом – $KПГ(5, 4, 3)$ (рис. 10).

В общем случае ($p \geq 3$ и $\sigma = 3$), (см. табл. 4) сеть C_2N_2 с $N_2 = N_1^2$ строится аналогичным образом. Затем она описанным ранее способом посредством внутреннего распараллеливания с использованием p копий второго каскада преобразуется в неблокируемый самомаршрутизируемый коммутатор K_2N_2 , который обладает двухканальной отказоустойчивостью.

Таблица 5

Характеристики коммутаторов K_2N_2 с одноканальной отказоустойчивостью

p	N_1	$N_2 = N_1^2$	$T_2 = p$	S_2	L_2
2	2	4	2	$144 = N_2^{3,58}$	$56 = N_2^{2,9}$
3	4	16	3	$1536 = N_2^{2,65}$	$432 = N_2^{2,19}$
4	7	49	4	$9\ 800 = N_2^{2,37}$	$2\ 156 = N_2^{1,97}$
5	11	121	5	$43\ 560 = N_2^{2,23}$	$7\ 865 = N_2^{1,87}$
6	15	225	6	$132\ 300 = N_2^{2,18}$	$20\ 250 = N_2^{1,84}$
7	21	441	7	$395\ 136 = N_2^{2,12}$	$52\ 479 = N_2^{1,79}$
8	27	729	8	$944\ 784 = N_2^{2,09}$	$110\ 808 = N_2^{1,77}$

Таблица 6

**Характеристики коммутаторов K_2N_2
с двухканальной отказоустойчивостью**

p	N_1	$N_2 = N_1^2$	$T_2 = p$	S_2	L_2
3	3	9	3	$864 = N_2^{3,08}$	$243 = N_2^{2,50}$
4	5	25	4	$5\,000 = N_2^{2,65}$	$1\,100 = N_2^{2,18}$
5	7	49	5	$17\,640 = N_2^{2,52}$	$3\,185 = N_2^{2,07}$
6	11	121	6	$71\,148 = N_2^{2,31}$	$10\,890 = N_2^{1,94}$
7	15	225	7	$201\,600 = N_2^{2,26}$	$26\,775 = N_2^{1,88}$
8	19	361	8	$467\,856 = N_2^{2,22}$	$54\,872 = N_2^{1,85}$

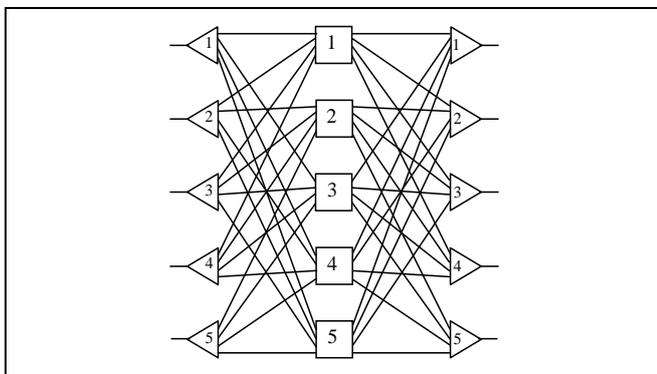


Рис. 10. Неблокируемый самомаршрутизируемый дуальный коммутатор КПГ(5, 4, 3) с двухканальной отказоустойчивостью

Сравним сложность коммутатора K_2N_2 с двухканальной отказоустойчивостью со сложностью коммутатора, имеющего топологию полного графа и троированные каналы, например, при $p = 4$ ($N_2 = 25$). Для последнего коммутационная сложность оценивается как $S_2 = N_2^{2,55}$, а канальная сложность – как $L_2 = N_2^{2,34}$. Коммутационные сложности сопоставимы, а канальная сложность у коммутатора K_2N_2 существенно меньше. При этом коммутатор с топологией полного графа имеет в четыре раза меньший период разрядов.

Проведем в коммутаторе K_2N_2 заданное сечение после дуальных коммутаторов КПГ(N_1, p, σ), т. е. на входе слоев выходных мультиплексоров. Тогда при любых значениях p и σ справедлива следующая лемма.

Лемма 2. Дуальный коммутатор K_2N_2 имеет прямую p -перестановку на указанном сечении. Он является неблокируемым коммутатором со статической маршрутизацией на любой обратной p -перестановке при любом p и обладает $(\sigma - 1)$ -канальной отказоустойчивостью.

Доказательство. Первое утверждение опирается на использование дуального коммутатора КПГ(N_1, p, σ) и справедливость для него леммы 1. Второе утверждение опирается на неблокируемость коммутатора КПГ(N_1, p, σ) и тот факт, что обратная p -перестановка состоит из разреженных 1-перестановок, разреженных по разным тактам. Объединение разреженных альтернативных перестановок посредством вырезанных мультиплексоров M_p не порождает никаких конфликтов.

Свойство $(\sigma - 1)$ -канальной отказоустойчивости следует из того, что все пути между входными демультиплексорами D_p и выходными мультиплексорами M_p проходят по p копиям второго каскада сети C_2N_2 в схеме первого измерения и $p \geq \sigma$. С другой стороны, из любого источника в исходном дуальном коммутаторе КПГ(N_1, p, σ) выходит только σ разных путей, и их отказ разрушит связность сети. ♦

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика построения нового вида неблокируемых самомаршрутизируемых фотонных сетей в виде двухкаскадного коммутатора, обладающего $(\sigma - 1)$ -канальной отказоустойчивостью. Отличием нового вида коммутаторов от предложенных авторами ранее в предыдущих работах является их новое свойство – канальная отказоустойчивость. Добиться канальной отказоустойчивости позволила замена базового дуального коммутатора с топологией квазиполного орграфа из работы [5] на дуальный коммутатор с топологией квазиполного графа. В результате такой замены между каждой парой «вход – выход» в предлагаемых коммутаторах физически реализуется не один канал связи, как в первоначальных фотонных коммутаторах [1–4], а два или три. Каждый дополнительный канал позволяет использовать его в случае неисправности основного канала. С повышением отказоустойчивости фотонных коммутаторов очевидно возросли их канальная и коммутационная сложности. В настоящей работе приведены выражения для расчета этих характеристик в зависимости от числа каналов.

Кроме того, предлагаемые варианты отказоустойчивых двухкаскадных коммутаторов плохо масштабируются методом внешнего инвариантного распараллеливания с использованием дополнительных мультиплексоров и демультиплексоров [5], который применялся в работе [4] для масшта-



бирования двухкаскадного коммутатора без канальной отказоустойчивости на основе квазиполного орграфа. Например, коммутатор K_216 с одноканальной отказоустойчивостью (рис. 12) может быть расширен с использованием мультиплексов M_3 и демультимплексов D_3 только до коммутатора K_220 , и при повторном расширении – до коммутатора K_225 .

Поэтому возникает следующая задача в направлении совершенствования фотонных сетей большой размерности, а именно – построение неблокируемого самомаршрутизируемого отказоустойчивого многокаскадного коммутатора широкой масштабируемости. Данная задача может быть решена посредством его расширения в четырехкаскадный и восьмикаскадный неблокируемые коммутаторы на основе разработки и применения обобщенного метода внутреннего распараллеливания.

При этом коммутационную показательную сложность можно существенно уменьшить посредством повышения числа каскадов сети и использования обобщенного способа внутреннего распараллеливания в каждом каскаде. Такой подход к масштабированию отказоустойчивых фотонных коммутаторов представляет собой продолжением данного исследования и будет рассмотрен в отдельной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Подлазов В.С. Многокаскадные коммутаторы для оптических и электронных суперкомпьютерных систем // Матер. 8-го Национального Суперкомпьютерного Форума (НСКФ-2019, Переславль-Залесский). 2019. URL: http://2019.nscf.ru/TesisAll/02_Apparatura/037_BarabanovaEA.pdf. [Barabanova, E.A., Vytovtov, K.A., Podlazov, V.S. *Mnogokaskadnye kommutatory dlya opticheskikh i elektronnykh superkomp'yuternykh sistem* // Materialy 8-go Nacional'nogo Superkomp'yuternogo Forum (NSKF-2019, Pereslavl'-Zalesskiy). – 2019. (In Russian)]
2. Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Вишневецкий В.М., Подлазов В.С. Новый принцип построения оптических устройств обработки информации для информационно-измерительных систем // Датчики и системы. – 2019. – № 9. – С. 3–9. [Barabanova, E.A., Vytovtov, K.A., Vishnevskiy, V.M., Podlazov, V.S. *The new principle for the construction of optical information processing devices for information-measuring systems* // Sensors and Systems. – 2019. – No. 9. – P. 3–9. (In Russian)]
3. Barabanova, E., Vytovtov, K., Podlazov, V., Vishnevskiy, V. Model of optical non-blocking information processing system for next-generation telecommunication networks // Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2019, Moscow). – 2019. – 1141. – P. 188–198. – DOI: 10.1007/978-3-030-36625-4_16.
4. Барабанова Е.А., Вытовтов К.А., Подлазов В.С. Двухкаскадные дуальные фотонные коммутаторы в расширенном схемном базисе // Проблемы управления. – 2021. – № 1. – С. 69–81. [Barabanova, E.A., Vytovtov, K.A., Podlazov, V.S. *Two-stage dual photon switches in an extended scheme basis* // Control Sciences. – 2021. – No. 1. – P. 69–81. (In Russian)]
5. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 12. – С. 166–177. [Karavai, M.F., Podlazov, V.S. *An invariant extension method for system area networks of multicore computational systems. An ideal system network* // Automation Remote Control. – 2010. – Vol. 71, no. 12. – P. 2644–2654.]
6. Pipenger, N. On rearrangeable and non-blocking switching networks // J. Comput. Syst. Sci. – 1978. – Vol. 17. – P. 307–311.
7. Scott, S., Abts, D., Kim J. and Dally, W. The Black Widow High-radix Clos Network // Proc. 33rd Intern. Symp. Comp. Arch. (ISCA'2006). 2006. URL: https://www.researchgate.net/publication/4244660_The_BlackWidow_High-Radix_Clos_Network.
8. Gu, Q.P. and Tamaki, H. Routing a permutation in hypercube by two sets of edge-disjoint paths // J. of parallel and distributed comput. – 1997. – Vol. 44, no. 2. – P. 147–152.
9. Lubiw, A. Counterexample to a conjecture of Szymanski on hypercube routing // Inform. proc. let. 1990. – Vol. 35(2). – P. 57–61.
10. Alverson, R., Roweth, D. and Kaplan, L. The Gemini System Interconnect // 18th IEEE Symposium on High Performance Interconnects. – 2009. – P. 3–87.
11. Ajima, Y., Inoue, T., Hiramoto, S., Shimiz, T. Tofu: Interconnect for the K computer // URL: https://www.researchgate.net/publication/265227674_Tofu_Interconnect_for_the_K_computer.
12. Arimili, B., Arimili, R., Chung, V., et al. The PERCS High-Performance Interconnect // 18th IEEE Symposium on High Performance Interconnects. – 2009. – P. 75–82.
13. Daniele De Sensi, Salvatore Di Girolamo, Kim H. McMahon, Duncan Roweth, Torsten Hoefler. An In-Depth Analysis of the Slingshot Interconnect // arXiv: – 2008.08886v1. – [csDC]. – 20Aug 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/343786515_An_In-Depth_Analysis_of_the_Slingshot_Interconnect.
14. Stepanenko, S. Structure and Implementation Principles of a Photonic Computer // EPJ Web of Conferences 224. – 04002. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201922404002>
15. Babaei, A., Momeni, A., Abdolali, A., Fleury, R. Parallel Optical Computing Based on MIMO Metasurface Processors with Asymmetric Optical Respones // Phys. Rev. – Applied 15. – 044015. – 2021.
16. Cheng, Q., Glick, M., Bergman, K. Optical Interconnection Networks for High Performance Systems // Optical Fiber Telecommunications VII. – 2019. – P. 785–825.
17. Maniotis, P., Dupuis, N., Kuchta, D.M., Taubenblatt, M.A., Lee, B.G. Intra-node high-performance computing network architecture with nanosecond-scale photonic switches // Journal of Optical Communications and Networking. – 2020. – 12(12). – P. 367–377.
18. Duro, J., Petit, S., Góme, M.E., Sahuquillo, J. Segment Switching: A New Switching Strategy for Optical HPC Networks // IEEE Access. – 2021. – 9. – P. 43095–43106.

19. Lee, B.G., Dupuis, N., Pepeljugoski, P., et al. Silicon photonic switch fabrics in computer communications systems // Journal of lightwave technology. – 2015. – 33(4). – P. 768–777.
20. Krishnamoorthy, A.V., Ho, R., Zheng, X., et al. Computer systems based on silicon photonic interconnects // Proceedings of the IEEE. – 2009. – 97(7). – P. 1337–1361.
21. Cheng, Q., Rumley, S., Bahadori, M., Bergman, K. Photonic switching in high performance datacenters // Optics express. – 16022. – 2018. – 26(12).
22. Meyer, H., Sancho, J.C., Mrdakovic, M., et al. Optical packet switching in HPC. An analysis of applications performance // Future Generation Computer Systems. – 2018. – 82. – P. 606–616.
23. Seok, T.J., Kwon, K., Henriksson, J., et al. Wafer-scale silicon photonic switches beyond die size limit // Optica. – 2019. – 6(4). – P. 490–494.
24. Холл М. Комбинаторика. Главы 10-12. – Мир. М. – 1970. – 424 с. [Hall, M. Combinatorial Theory // Blaisdell Publishing Company. Waltham. – 1967.]
25. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей // Проблемы управления. – 2012. – № 4. – С. 45–51. [Karavaj, M.F., Podlazov, V.S. Ex-

panded block-diagrams for «Ideal» system area networks // Control Sciences. – 2012. – No. 4. – P. 45–51. (In Russian)].

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

*Поступила в редакцию 11.03.2021,
после доработки 13.05.2021.
Принята к публикации 13.05.2021.*

Барабанова Елизавета Александровна – д-р техн. наук, ✉ elizavetaalex@yandex.ru,

Вывотов Константин Анатольевич – д-р техн. наук, ✉ vyvotov_konstan@mail.ru,

Подлазов Виктор Сергеевич – д-р техн. наук, ✉ podlazov@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

NON-BLOCKING FAULT-TOLERANT TWO-STAGE DUAL PHOTON SWITCHES

E.A. Barabanova¹, K.A. Vytovtov^{2,3}, and V.S. Podlazov³

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹✉ elizavetaalex@yandex.ru, ²✉ vyvotov_konstan@mail.ru, ³✉ podlazov@ipu.ru

Abstract. This paper further develops the theory of constructing a fundamentally new class of system area networks—non-blocking dual photon networks with static self-routing. These networks have scalability, high speed inherent in photon systems, and complexity comparable to a full switch. The use of an extended scheme basis (dual photon switches and separate photon multiplexers and demultiplexers) allows balancing the scalability-speed and complexity-speed ratios. This paper proposes a method for constructing a two-stage fault-tolerant dual network with the indicated properties based on networks with the quasi-complete graph and quasi-complete digraph topologies and the invariant extension method with internal parallelization.

Keywords: photon switch, dual switch, photon multiplexers and demultiplexers, multi-stage switch, conflict-free self-routing, non-blocking switch, static self-routing, quasi-complete digraph, quasi-complete graph, switching properties, direct channels, scalability, speed and fault tolerance.