

Научная статья

УДК 004.724.2 + 004.272.43

doi: 10.17223/19988605/62/13

Простая масштабируемая коммутируемая управляющая сеть**Михаил Фёдорович Каравай¹, Виктор Сергеевич Подлазов²,
Владимир Владимирович Соколов³**^{1, 2, 3} *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*¹ *mkaravay@yandex.ru*² *podlazov@gmail.com*³ *sok25101946@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается проектирование локальных управляющих сетей на базе квазиполных орграфов. Считается, что сеть содержит активное вычислительное ядро произвольных размеров и множество пассивных абонентов, последние не взаимодействуют друг с другом. Абоненты активного ядра имеют бесконфликтный параллельный доступ друг к другу и ко всем пассивным абонентам. В отличие от предложенных ранее сетей на базе квазиполных графов новая база позволяет существенно уменьшить сложность сетей и улучшить их масштабируемость. При этом сохраняются важнейшие функционалы сетей: бесконфликтность параллельных передач, отсутствие дедлоков, самомаршрутизируемость, схемная и канальная отказоустойчивость.

Ключевые слова: локальные управляющие сети; квазиполные графы и орграфы; параллельные системы; бесконфликтность передач.

Для цитирования: Каравай М.Ф., Подлазов В.С., Соколов В.В. Простая масштабируемая коммутируемая управляющая сеть // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 62. С. 115–123. doi: 10.17223/19988605/62/13

Original article

doi: 10.17223/19988605/62/13

Simple scalable switched control network**Mihail F. Karavay¹, Victor S. Podlazov², Vladimir V. Sokolov³**^{1, 2, 3} *V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation*¹ *mkaravay@yandex.ru*² *podlazov@gmail.com*³ *sok25101946@gmail.com*

Abstract. The design of local control networks based on quasicomplete digraphs is considered. It is believed that the network contains an active computing core of arbitrary size and a set of passive subscribers, the latter do not interact with each other. Subscribers of the active core have conflict-free parallel access to each other and to all passive subscribers. Unlike previously proposed networks based on quasi-complete graphs, the new base can significantly reduce the complexity of networks and improve their scalability. At the same time, the most important functionals of networks are preserved: conflict-free parallel transmissions, no deadlocks, self-routing, circuit and channel fault tolerance.

Keywords: local control networks; quasicomplete graphs and digraphs; parallel systems; conflict-free transfers.

For citation: Karavay, M.F., Podlazov, V.S., Sokolov, V.V. (2023) Simple scalable switched control network. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 62. pp. 115–123. doi: 10.17223/19988605/62/13

Введение

В работе [1] управляющие сети (УС) рассматриваются как коммутируемые УС (КУС) в отличие от шинных и многошинных УС (ШУС). Основное преимущество КУС перед ШУС – более высокие помехоустойчивость и масштабируемость при существенно более низких частотах работы устройств и одинаковой производительности. В УС различаются два вида устройств – активные и пассивные. Активные устройства (АУ) управляют работой пассивных устройств (ПУ), как правило, в последовательном режиме. АУ имеют полные связи между собой и с ПУ, которые не имеют связей между собой и имеют связи только с АУ. В работе [1] впервые предложено строить КУС как сети с топологией квазиполных графов, которые состоят из $N = m(m-1)/\sigma + 1$ m -портовых АУ, связанных дуплексными каналами через N коммутаторов $m \times m$. Соединения между коммутаторами и АУ задаются таблицами инцидентности симметричных блок-схем (block-designs) $B(N, m, \sigma)$, изучаемых в комбинаторике [2].

Пример таблицы инцидентности для $B(13, 4, 1)$ приведен в табл. 1, в которой 1-й столбец задает номера коммутаторов сети, выделенные курсивом, а строки в остальных столбцах задают номера АУ, подсоединенных к каждому коммутатору.

Сети с топологией квазиполных графов и орграфов использовались ранее авторами для оптимизации характеристик ряда системных сетей многопроцессорных вычислительных систем [3–7].

Пусть теперь в КУС имеется только три АУ с номерами 1–3, а остальные 10 устройств являются ПУ, между которыми соединения не нужны. Для исключения этих соединений в табл. 1 вычеркиваются строки, отмеченные заливкой, которые не содержат АУ с номерами 1–3, и производится перенумерация оставшихся коммутаторов. В результате образуется табл. 2, которая задает соединения в такой КУС.

Таблица 1

Таблица соединений для сети с топологией квазиполного графа при $m = 4$

<i>1</i>	1	13	11	5
<i>2</i>	2	1	12	6
<i>3</i>	3	2	13	7
<i>4</i>	4	3	1	8
<i>5</i>	5	4	2	9
<i>6</i>	6	5	3	10
<i>7</i>	7	6	4	11
<i>8</i>	8	7	5	12
<i>9</i>	9	8	6	13
<i>10</i>	10	9	7	1
<i>11</i>	11	10	8	2
<i>12</i>	12	11	9	3
<i>13</i>	13	12	10	4

Таблица 2

Таблица соединений для КУС с 3 АУ, 9 ПУ и 9 коммутаторами

<i>1</i>	1	13	11	5
<i>2</i>	2	1	12	6
<i>3</i>	3	2	13	7
<i>4</i>	4	3	1	8
<i>5</i>	5	4	2	9
<i>6</i>	6	5	3	10
<i>7</i>	10	9	7	1
<i>8</i>	11	10	8	2
<i>9</i>	12	11	9	3

Будем характеризовать КУС, создаваемые описанным образом, следующими параметрами: α – число АУ, $\pi = N - \alpha$ – число ПУ и κ – число коммутаторов. Обозначим $KYC(\alpha, \pi, \kappa)$ и определим

коммутационную сложность сети S количеством точек коммутации и канальную сложность L , выраженную числом дуплексных каналов. В такой КУС все АУ имеют бесконфликтные соединения на произвольных перестановках пакетов между ними, каждый АУ имеет соединение с любым ПУ и все АУ имеют бесконфликтные соединения с непересекающимися множествами ПУ.

Дополнительно предполагается, что множество портов каждого АУ создается их подсоединением через встречные демультиплексоры $1 \times m$ и мультиплексоры $1 \times m$ сложности m каждый. Тогда коммутационная сложность КУС(α , π , κ) задается как $S = \kappa m^2 + 2mN = \pi^\gamma$, где $\gamma = \log_\pi S$, а канальная сложность – как $L = mN = \pi^\lambda$, где $\lambda = \log_\pi L$, и по ним рассчитываются удельные сложности $s = S/\pi = \pi^{\gamma-1}$ и $l = L/\pi = \pi^{\lambda-1}$. В табл. 3 приводятся характеристики КУС(4, $N - 4$, κ) при разных m .

Таблица 3

Характеристики КУС с $\alpha = 4$ и $\sigma = 1$

m	π	κ	S	s	L	l
4	9	10	$264 = \pi^{2,54}$	$\pi^{1,54}$	$40 = \pi^{1,68}$	$\pi^{0,68}$
5	17	14	$560 = \pi^{2,23}$	$\pi^{1,23}$	$70 = \pi^{1,5}$	$\pi^{0,5}$
7	Не существует					
6	27	19	$1\,056 = \pi^{2,11}$	$\pi^{1,11}$	$114 = \pi^{1,44}$	$\pi^{0,44}$
8	53	27	$2\,640 = \pi^{1,98}$	$\pi^{0,98}$	$216 = \pi^{1,35}$	$\pi^{0,35}$
9	69	31	$3\,825 = \pi^{1,95}$	$\pi^{0,95}$	$279 = \pi^{1,33}$	$\pi^{0,33}$
10	87	39	$5\,720 = \pi^{1,94}$	$\pi^{0,94}$	$390 = \pi^{1,33}$	$\pi^{0,33}$

К недостаткам КУС с топологией квазиполных графов можно отнести слабую масштабируемость, осуществляемую только за счет увеличения степени m , и довольно высокую сложность за счет большого числа коммутаторов κ . Здесь решается задача создания КУС большей масштабируемости и меньшей сложности на основе сетей с топологией квазиполных орграфов.

1. Квазиполные орграфы

Известен двумерный m -ичный гиперкуб [8. Р. 323] с $N = m^2$ узлами, в котором из каждого узла выходит набор ребер с длинами $(1, 2, \dots, m-1, m, 2m, \dots, (m-1)m)$. Длиной дуги мы называем разницу номеров по $\text{mod } N$ инцидентных ей узлов. В таком мультикольце все узлы имеют одинаковые степени $(m-1)$ входных и выходных ребер (рис. 1).

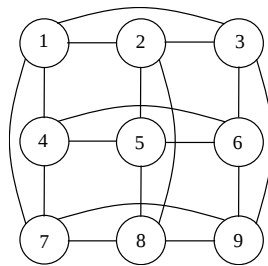


Рис. 1. Двумерный 3-ичный гиперкуб
Fig. 1. Two-dimensional 3-ary hypercube

В реальности каждый узел содержит абонента и коммутатор $m \times m$ полустепени m , связанных $2m$ дугами соответствующих длин (рис. 2). В таком представлении 2-мерный m -ичный гиперкуб является орграфом с $2N$ узлами двух сортов – абонентов и коммутаторов соответственно. В таком качестве он может быть представлен как двудольный квазиполный орграф с $N = m^2$ узлами в каждой доле (рис. 3). Соединения в нем задаются разными таблицами инцидентности для дуг от абонентов и дуг к абонентам (табл. 4).

В сетях с топологией квазиполного орграфа, в отличие от квазиполного графа, связи между абонентами во встречных направлениях проходят по симплексным каналам по разным маршрутам.

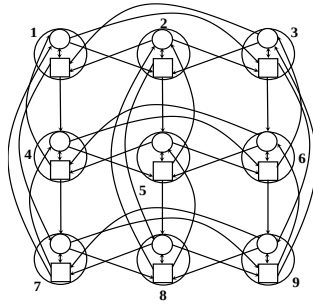


Рис. 2. 2-мерный 3-ичный гиперкуб как орграф
Fig. 2. 2-dimensional 3-ary hypercube as a digraph

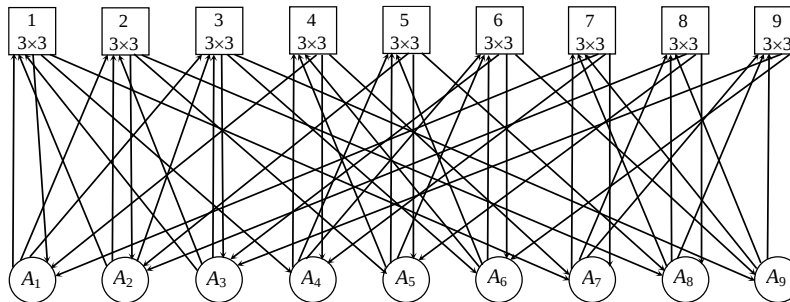


Рис. 3. Квазиполный орграф при $m = 3$
Fig. 3. Quasicomplete digraph for $m = 3$

Таблица 4

Таблицы инцидентности для квазиполного орграфа при $m = 3$

Коммутаторы	Дуги от абонентов			Дуги к абонентам		
	1	2	3	1	4	7
1	1	2	3	1	4	7
2	1	2	3	2	5	8
3	1	2	3	3	6	9
4	4	5	6	1	4	7
5	4	5	6	2	5	8
6	4	5	6	3	6	9
7	7	8	9	1	4	7
8	7	8	9	2	5	8
9	7	8	9	3	6	9

2. Простая коммутируемая управляющая сеть

На основе квазиполного орграфа можно построить коммутируемую управляющую сеть $КУС(m, N - m, N)$ с двумя множествами абонентов – активных устройств A_i ($i \leq m$) и пассивных устройств P_i ($m < i \leq N$), которая представлена на рис. 4 для $m = 3$. В этой сети любое АУ может бесконфликтно передать пакет любому ПУ при произвольной перестановке пакетов между ними.

Как и ранее, предполагается, что множество входных и выходных портов каждого абонента создается посредством их подсоединения через мультиплексоры $1 \times m$ и демультиплексоры $1 \times m$ соответственно (см. рис. 4). В схеме $КУС(3, 6, 9)$ абоненты имеют двойную нумерацию – по таблице соединений (см. табл. 4) и как АУ и ПУ.

Соединения в $КУС(3, 6, 9)$ задаются табл. 4. Выделим в табл. 4 соединения от ПУ к коммутаторам с номерами больше 3 и удалим их (табл. 5). Тогда в редуцированной таблице соединений образуются группы из трех строк с входами от одинаковых наборов ПУ и с выходами к одному АУ, имеющему разные номера для разных строк в группе. Эти группы выделены разной заливкой. Каждую такую группу строк можно заменить на одну строку с одним коммутатором и со входами от ПУ

в группе и с выходами ко всем АУ. При этом образуется табл. 6, которая задает таблицу соединений уже для КУС(3, 6, 5) с минимальным числом коммутаторов, равным 5. На рис. 5 представлена схема КУС(3, 6, 5), которая имеет вид минимального квазиполного орграфа.

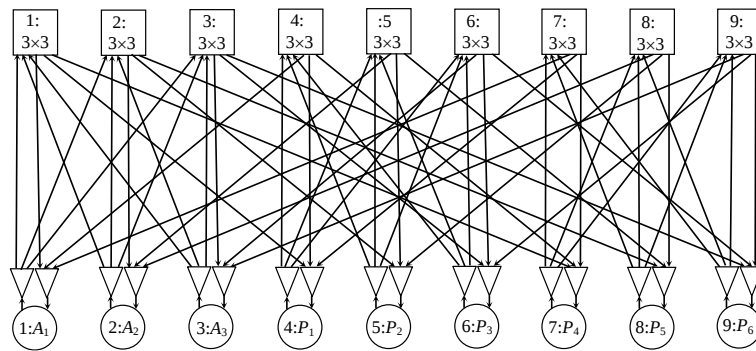


Рис. 4. КУС(3, 6, 9) с 1-портовыми абонентами
Fig. 4. Control network (3, 6, 9) with 1-port subscribers

Таблица 5

Редукция таблицы соединений для КУС(3, 6, 9)

Коммутаторы	Дуги от абонентов			Дуги к абонентам		
	1	2	3	1	4	7
1	1	2	3	1	4	7
2	1	2	3	2	5	8
3	1	2	3	3	6	9
4	4	5	6	1		
5	4	5	6	2		
6	4	5	6	3		
7	7	8	9	1		
8	7	8	9	2		
9	7	8	9	3		

Таблица 6

Таблицы соединений для редуцированной КУС(3, 6, 5)

Коммутаторы	Дуги от абонентов			Дуги к абонентам		
	1	2	3	1	4	7
1	1	2	3	1	4	7
2	1	2	3	2	5	8
3	1	2	3	3	6	9
4	4	5	6	1	2	3
5	7	8	9	1	2	3

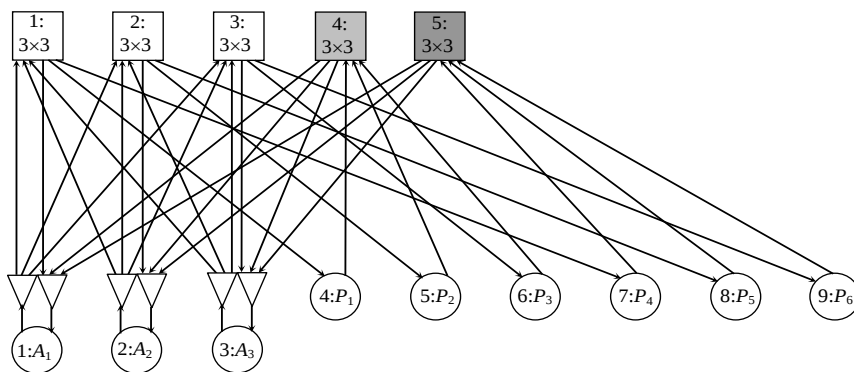


Рис. 5. Редуцированная КУС(3, 6, 5)
Fig. 5. Reduced control network (3, 6, 5)

Аналогичное редуцирование сети можно провести и для КУС(6, 30, 36). В результате описанного выше редуцирования образуется КУС(6, 30, 11) с минимальным числом коммутаторов.

В КУС($m, N - m, 2m - 1$) все каналы являются полудуплексными. Поэтому канальная сложность сети в дуплексных каналах задается как $L = m^2 + N - m = 2m^2 - m$. Коммутационная сложность этой сети задается как $S = m(m^2 + 2m) + (m - 1)m^2 = 2m^3 + m^2$. В частности, при $m = 4$ для КУС(4, 12, 7) имеем $L = 28 = \pi^{1,34}$, $l = \pi^{0,34}$ и $S = 144 = \pi^{2,0}$, $s = \pi^{1,0}$. Это существенно меньше, чем в КУС(4, 9, 10) с топологией квазиполного графа (см. табл. 3) при меньшем числе ПУ в последней.

Для простой КУС(m, π, κ) заголовки пакетов от АУ должны содержать номера выходных портов мультиплексоров и восходящих коммутаторов, а заголовки от ПУ – выходных портов нисходящих коммутаторов.

3. Масштабирование простой коммутируемой управляющей сети

Простая сеть КУС(m, π, κ) допускает увеличение числа ПУ в m^{r+1} раз, т.е. преобразование в сеть КУС(m, π_r, κ) с $\pi_r = \pi m^{r+1}$, посредством использования r ярусов демультиплексоров и мультиплексоров. Масштабирование посредством одного яруса состоит во вставке демультиплексора $1 \times m$ в каналы от ПУ и мультиплексора $m \times 1$ в каналы к ПУ, а их выходы и входы, соответственно, подсоединяются к m разным ПУ. На рис. 6 приведен пример частичного 1-ярусного масштабирования. При максимальном 1-ярусном масштабировании сеть КУС(3, 6, 5) преобразуется в КУС(3, 18, 5).

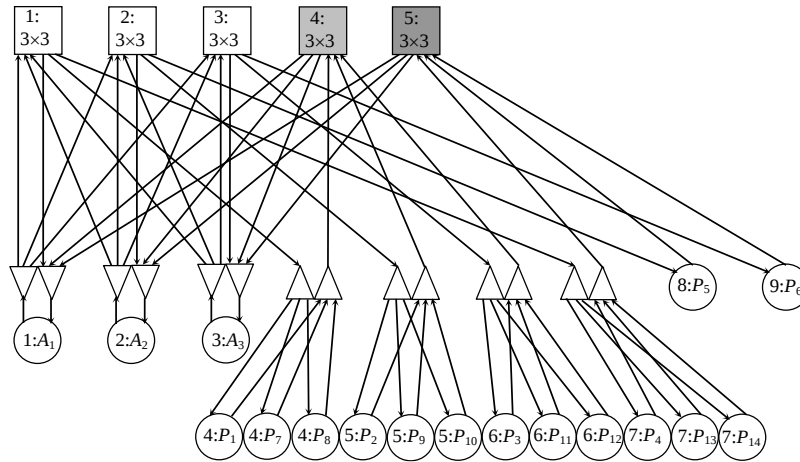


Рис. 6. Частичное 1-ярусное масштабирование КУС(3, 6, 5) в КУС(3, 14, 5)

Fig. 6. Partial 1-tier scaling control network (3, 6, 5) to control network (3, 14, 5)

Важно подчеркнуть, что в масштабированной сети КУС(m, π_r, κ) каждое АУ имеет двустороннюю связь с каждым из ПУ.

При 1-ярусном масштабировании канальная сложность КУС(m, π_1, κ) задается как $L_1 = L + \pi m = m^2 + N - m + (N - m)m = Nm + N - m = m^3 + m^2 - m$, а коммутационная сложность – как $S_1 = S + 2m\pi = 2m^3 + m^2 + 2(N - m)m = 4m^3 - m^2$. В частности, при $m = 4$ для КУС(4, 48, 8) имеем $L_1 = 76 = \pi^{1,12}$, $l_1 = \pi^{0,12}$ и $S_1 = 240 = \pi^{1,42}$, $s_1 = \pi^{0,42}$, что существенно меньше, чем в КУС(4, 53, 27) с топологией квазиполного графа (см. табл. 3) при близком числе ПУ.

Для масштабированной КУС(m, π_r, κ) заголовки пакетов от АУ должны дополнительно содержать номера выходных портов мультиплексоров в каждом добавленном ярусе.

4. Обобщение простой коммутируемой управляющей сети

В исходной постановке задачи число АУ α считается фиксированным и не зависящим от значения $m > \alpha$ ($\alpha = 4$ в [1]; см. табл. 3). Структуру простой КУС($m, N - m, 2m - 1$) можно подстроить под такую постановку, обеспечивая при этом увеличение числа ПУ на $m - \alpha$ единиц.

Таблица соединений для КУС(4, 32, 11)

Коммутаторы	Дуги от абонентов						Дуги к абонентам					
	1	2	3	4			1	7	13	19	25	31
1	1	2	3	4			1	7	13	19	25	31
2	1	2	3	4			2	8	14	20	26	32
3	1	2	3	4			3	9	15	21	27	33
4	1	2	3	4			4	10	16	22	28	34
5	1	2	3	4	31		31	11	17	23	29	35
6	1	2	3	4	32		32	12	18	24	30	36
7	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
8	13	14	15	16	17	18	1	2	3	4	5	6
9	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6
10	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6
11	31	32	33	34	35	36	1	2	3	4	5	6

Строится простая КУС($m, N - m, 2m$) и из нее удаляется $m - \alpha$ АУ со всеми входными / выходными каналами. В табл. 7 это показано для $m = 6$ и $\alpha = 4$. При этом освобождается $m - \alpha$ входных портов коммутаторов и по одному выходному порту у $m - \alpha$ коммутаторов. К ним подсоединяется $m - \alpha$ дополнительных ПУ, номера которых выделены заливкой. При этом часть входных портов m коммутаторов остается свободной. Таким образом, получается таблица соединения для обобщенной КУС($\alpha, N - \alpha, 2m - 1$).

5. Простая коммутируемая управляющая сеть с канальной отказоустойчивостью

Таблицу соединений для простой управляющей сети с $\alpha = m$ и $\pi = N - m$ можно формировать по восходящим и нисходящим каналам между АУ и ПУ через отдельные коммутаторы. В результате для $m = 3$ образуется простая КУС*($m, N - m, 2m$), которая содержит избыточные каналы, используемые для соединения восходящих и нисходящих коммутаторов (рис. 7).

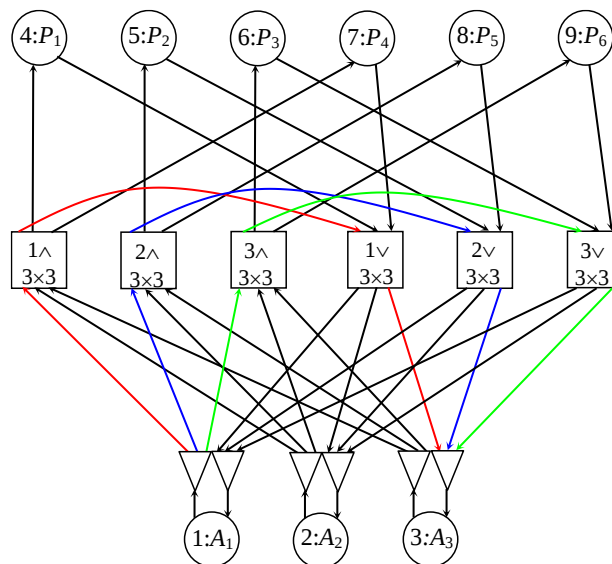


Рис. 7. Простая КУС(3, 6, 6), с 2-канальной отказоустойчивостью между АУ
Fig. 7. Simple control network (3, 6, 6), with 2-channel fault tolerance between active units

КУС*($m, N - \alpha, 2m$) обладает $(m - 1)$ -канальной отказоустойчивостью связей между АУ. В этой сети коммутаторы делятся на восходящие ($\wedge$) на путях от АУ к ПУ и нисходящие ($\vee$) на путях от ПУ к АУ. При этом в коммутаторах остаются свободными по одному выходному и входному порту, которые соединяются указанными выше избыточными каналами, что и обеспечивает канальную отказоустойчивость.

Заключение

В работе предложена методика построения коммутационных управляющих сетей с топологией квазиполных орграфов. Даны формулы для расчета числа активных и пассивных устройств в них и расчета значений канальной и коммутационных сложностей. Показано, что они имеют существенно меньшую коммутационную сложность и существенно лучшую масштабируемость, чем ранее предложенные сети с топологией квазиполных графов.

Список источников

1. Каравай М.Ф., Михайлов А.М. Design of local heterogeneous system control networks of a new generation with the preservation of the optimality of the main topological functionals of the network // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2091. Art. 012038.
2. Каравай М.Ф., П.П. Пархоменко П.П., Подлазов В.С. Комбинаторные методы построения двудольных однородных минимальных квазиполных графов (симметричных блок-схем) // *Автоматика и телемеханика*. 2009. № 2. С. 153–170.
3. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Расширенные блок-схемы для идеальных системных сетей // *Проблемы управления*. 2012. № 4. С. 45–51.
4. Каравай М.Ф., Подлазов В.С. Топологические резервы суперкомпьютерного интерконекта // *Управление большими системами*. 2013. Вып. 41. С. 395–423.
5. Барабанова Е.А., Выговтов К.А., Подлазов В.С. Неблокируемые отказоустойчивые двухкаскадные дуальные фотонные коммутаторы // *Проблемы управления*. 2021. № 4. С. 82–91.
6. Подлазов В.С. Неблокируемые отказоустойчивые дуальные фотонные коммутаторы широкой масштабируемости // *Проблемы управления*. 2021. № 5. С. 70–87.
7. Barabanova E.A., Vitovtov K.A., Vishnevskii V.M., Podlazov V.S. High-capacity strictly non-blocking optical switches based on new dual principle // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 2091. Art. 012040.
8. Bhuyan L.N., Agrawal D.P. Generalized Hypercube and Hyperbus Structures for a Computer Network // *IEEE Trans. on Computers*. 1984. V. C-33, № 4. P. 323–333.

References

1. Karavay, M.F. & Mikhailov, A.M. (2021) Design of local heterogeneous system control networks of a new generation with the preservation of the optimality of the main topological functionals of the network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2091. Art. 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012038
2. Karavay, M.F., Parkhomenko, P.P. & Podlazov, V.S. (2009) Combinatorial methods for constructing bipartite homogeneous minimal quasi-complete graphs (symmetric block diagrams). *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2. pp. 312–327.
3. Karavay, M.F. & Podlazov, V.S. (2012) Extended block diagrams for ideal system networks. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*. 74(4). pp. 710–724.
4. Karavay M.F. & Podlazov V.S. (2013) Topologicheskie rezervy superkomp'yuternogo interkonekta [Topological reserves of a supercomputer interconnect]. *Upravlenie bol'shimi sistemami*. 41. pp. 395–423.
5. Barabanova, E.A., Vitovtov, K.A. & Podlazov, V.S. (2021) Non-blocking fault-tolerant two-stage dual photonic switches. *Problemy upravleniya – Control Sciences*. 4. pp. 67–76.
6. Podlazov, V.S. (2021) Non-blocking fault-tolerant dual photonic switches of wide scalability. *Problemy upravleniya – Control Sciences*. 5. pp. 61–76.
7. Barabanova, E.A., Vitovtov, K.A., Vishnevskii, V.M. & Podlazov, V.S. (2021) High-capacity strictly non-blocking optical switches based on new dual principle. *Journal of Physics: Conference Series*. 2091. Art. 012040. DOI: 10.1088/1742-6596/2091/1/012040
8. Bhuyan, L.N. & Agrawal, D.P. (1984) Generalized Hypercube and Hyperbus Structures for a Computer Network. *IEEE Trans. on Computers*. C-33(4). pp. 323–333.

Информация об авторах:

Каравай Михаил Федорович – доктор технических наук, заведующий лабораторией технической диагностики Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия). E-mail: mkaravay@yandex.ru

Подлазов Виктор Сергеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия). E-mail: podlazov@gmail.com

Соколов Владимир Владимирович – старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, Россия). E-mail: sok25101946@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Karavay Mikhail F. (Doctor of Technical Sciences, Head Laboratory Technical Diagnostics of the V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of the RAS, Moscow, Russian Federation). E-mail: mkaravay@yandex.ru

Podlazov Viktor S. (Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of the RAS, Moscow, Russian Federation). E-mail: podlazov@gmail.com

Sokolov Vladimir V. (Senior Researcher of the V.A. Trapeznikov Institute of Control Science of the RAS, Moscow, Russian Federation). E-mail: sok25101946@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Received 10.09.2022; accepted for publication 01.03.2023

Поступила в редакцию 10.09.2022; принята к публикации 01.03.2023