

Р.Б. ТРЕГУБОВ, И.А. САИТОВ, С.И. САИТОВ  
**ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО БАЗИСА И  
СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ МНОГОПУТЕВЫХ МНОГОАДРЕСНЫХ  
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

---

*Трегубов Р.Б., Саитов И.А., Саитов С.И.* Элементы теоретико-множественного базиса и системы моделей многопутевых многоадресных инфокоммуникационных систем.

**Аннотация.** В статье предлагается новый подход к моделированию и проектированию инфокоммуникационных систем, в которых предусмотрена иерархическая многоуровневая маршрутизация. Рассмотрены элементы теоретико-множественного базиса и системы моделей инфокоммуникационной системы, оперирующие не только традиционными модельными элементами — двухполюсными сетями связи, — но и кратными сегментами типа цепь, звезда, кольцо и дерево. С использованием положений теории множеств основным понятиям и процедурам эталонной модели взаимодействия открытых систем ставятся в соответствие математические объекты, обеспечивающие строгое формальное описание инфокоммуникационной системы, в которой реализуются многопутевые многоадресные физические и логические соединения «точка-многоточка», «многоточка-точка», «многоточка-многоточка». На примере моделирования свойства структурной надежности конкретной инфокоммуникационной системы показаны конструктивность, надежность и системность разработанного подхода.

**Ключевые слова:** инфокоммуникационная система, многоточечные соединения, многоадресная многопутевая маршрутизация, моделирование, теоретико-множественный базис, структурная и параметрическая оптимизация.

---

**1. Введение.** Анализ современного состояния инфокоммуникаций показал, что основной объективно наблюдаемой тенденцией сегодня является активное применение различных услуг типа «точка-многоточка», «многоточка-точка», «многоточка-многоточка». Это телефонные и видеоконференции, множественный доступ к удаленным информационным ресурсам, интерактивная работа распределенных коллективов и пр. Все эти услуги подразумевают одновременное наличие в инфокоммуникационной системе (ИКС) нескольких многоточечных соединений различной топологии: цепь, звезда, кольцо и дерево. Для их реализации в ИКС предусмотрено наличие маршрутизирующих подсистем, обеспечивающих многоадресное [1, 2] и многопутевое [3-5] распределение сообщений как по физическим трактам (цепям, линиям передачи), так и по логическим каналам, трактам, туннелям и виртуальным частным сетям (VPN) [6].

Данные тенденции вступают в противоречие с существующими подходами к проектированию телекоммуникаций, в частности, с используемыми на практике аналитическими средствами решения частных структурно-сетевых задач оптимизации ИКС [7-12]. Исследования

показывают, что действующие ИКС проектировались под сеансы типа «точка-точка» на основе декомпозиции физической инфраструктуры на двухполюсные сети связи (ДСС) [7, 9, 13]. В настоящее время обслуживание пользователей через виртуальные соединения, туннели и *VPN* приводит к тому, что администрация ИКС не в полной мере может прогнозировать последствия каждого вновь организуемого многоточечного сеанса. Вследствие этого на практике все чаще наблюдаются различные негативные симптомы: либо срывы связи в ходе конференций, либо избыточные затраты ресурсов на их обеспечение.

Имитационные научно-методические средства лишь частично снимают остроту этих вопросов и только для наиболее типовых условий эксплуатации ИКС [8, 14-16]. Следовательно, существует объективная необходимость развития формально-математической базы проектирования ИКС на базе разработки специализированных моделей и методов, учитывающих многоточечность сеансов, многопутевость и многоадресность реализуемых способов маршрутизации, что обуславливает актуальность проблем, описываемых в данной статье.

**2. Идея разрабатываемого подхода.** Центральную гипотезу исследований можно сформулировать следующим образом: если ИКС реализует иерархическую, многоуровневую, многопутевую и многоадресную маршрутизацию, то и ее оптимизацию необходимо производить на базе моделей и методов, оперирующих соответствующими иерархически вложенными многопутевыми и многоадресными сегментами, а не только путем декомпозиции системы на двухполюсные сети (направления связи) связи. Для реализации такого подхода требуется развитие теоретических основ проектирования (оптимизации) ИКС в направлении преодоления целого ряда модельных и методических сложностей. Ниже выделены основные из них.

1. Реализация в ИКС одновременно целого множества многоадресных и многопутевых физических и логических соединений (виртуальных каналов, туннелей, *VPN*) требует адекватного описания (и контроля в ходе оптимизации) *соответствия (отношения)* тех или иных виртуальных (логических) каналов (туннелей, *VPN*) конкретной группе физических трактов и узлов коммутации. В существующих средствах проектирования (оптимизации) данные процедуры осуществляются только для ДСС, полученных в ходе декомпозиции ИКС. Для преодоления этой модельной сложности уже на этапе постановки задачи проектирования (оптимизации) предлагается использовать *теоретико-множественный базис* [17-19] представления подсистем, элементов, примитивов на разных уровнях обслуживания и существенных свойств ИКС, позволяющий описать объект исследования в

виде совокупности *множеств*, взаимоувязанных системой *соответствий* и *отношений*.

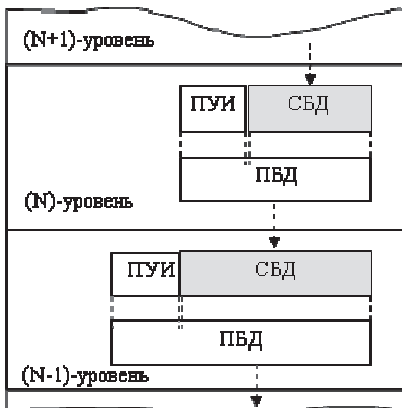
2. Модели, применяемые для описания физических и логических структур ИКС, а также закономерностей обслуживания блоков данных логическими соединениями (виртуальными каналами, туннелями, *VPN*), строятся на одних и тех же допущениях и ограничениях, разработанных под процедуры декомпозиции сети на ДСС и/или отдельные звенья [7, 9, 13, 20]. Эти формализмы отражают только *бинарные отношения* множеств каналов и узлов коммутации (например, инцидентность в ходе сеансов типа «точка-точка»). Для расширения возможностей существующего инструментария предлагается применить новую *систему моделей*, обеспечивающую учет как бинарных, так и *n*-нарных *отношений* и *соответствий* между множествами подсистем, элементов, примитивов и существенных свойств ИКС.

Далее будет показано, что при проектировании (оптимизации) ИКС, реализующей иерархическую многопутевую и многоадресную маршрутизацию для организации физических и логических соединений с топологиями цепь, звезда, кольцо и дерево, использование предлагаемых моделей, оперирующих кратными сегментами типа цепь, звезда, кольцо и дерево, а не только двухполюсными сетями связи, обеспечит при прочих равных условиях повышение достижимых характеристик эффективности обслуживания потоков блоков данных и структурной надежности этой системы.

**3. Теоретико-множественный базис анализа и оптимизации ИКС.** Предлагаемый базис опирается на положения теории иерархических многоуровневых систем [17], развитие которых для данной предметной области было предложено в [18]. В данной статье внимание уделено особенностям использования элементов этого подхода для ИКС. Описание объекта исследований далее осуществляется (рисунок 1) в терминах эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) [21], а записи математических выражений производятся при помощи понятий и символов, принятых в теории множеств [22].

Представление элементов ИКС в теоретико-множественном базисе (ТМБ) предусматривает введение комплекса модельных обозначений [18]. Так,  $SS_l^{(n)}$  — это подсистема *n*-го уровня, а  $SS_n = \{ \dots, SS_l^{(n)}, \dots \}$  — множество подсистем *n*-го уровня. При этом (N+1)-уровень — верхний уровень, смежный с (N)-уровнем; (N-1)-уровень — нижний уровень, смежный с (N)-уровнем. Протокольный

блок данных (ПБД) называется в соответствии с тем уровнем, который его формирует. Например, ПБД сетевого уровня — IP-пакет, в структуре которого выделяется сервисный блок данных (СБД) и протокольная управляющая информация (ПУИ).



$pdu_l^{(n)}$  – ПБД  $n$ -го уровня;  
 $PDU_n = \{ \dots, pdu_l^{(n)}, \dots \}$  – множество ПБД  $n$ -го уровня;  
 $sdu_l^{(n)}$  – СБД  $n$ -го уровня;  
 $SDU_n = \{ \dots, sdu_l^{(n)}, \dots \}$  – множество СБД  $n$ -го уровня;  
 $pci_l^{(n)}$  – ПУИ  $n$ -го уровня;  
 $PCI_n = \{ \dots, pci_l^{(n)}, \dots \}$  – множество ПУИ  $n$ -го уровня.

Рис. 1. Структура блоков данных в ИКС и их обозначение в ТМБ

На базе ТМБ можно описать различные процедуры с ПБД, реализуемые в ИКС. Например, сцепление, расцепление, объединение, разъединение, сегментирование и сборку блоков данных, мультиплексирование и демультимплексирование, коммутацию и маршрутизацию, в том числе многоточечную. Так, процессы преобразования ПБД между уровнями системы — это соответствие между  $k$ -й декартовой степенью множества ПБД  $n$ -го уровня и  $r$ -й декартовой степенью множества СБД  $(n-1)$ -го уровня, то есть:

$$\left( PDU_n^{\times k}, SDU_{n-1}^{\times r}, CDUBL_{n-1,k,r} \right) \Leftrightarrow PDU_n^{\times k} \xrightarrow{CDUBL_{n-1,k,r}} SDU_{n-1}^{\times r}, \quad (1)$$

где  $CDUBL_{n-1,k,r} = \{ \dots, cdubl_m^{(n-1,k,r)}, \dots \}$  — подмножество множества

пар  $cdubl_m^{(n-1,k,r)} = \left( \left( \underbrace{\dots, pdu_l^{(n)}, \dots}_k \right), \left( \underbrace{\dots, sdu_j^{(n-1)}, \dots}_r \right) \right)$ , состоящих из

кортежа ПБД  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$  и кортежа СБД  $(n-1)$ -го уровня с числом компонентов  $r$ , которые взаимосвязаны рассмотренным выше соответствием.

Всем логическим объектам  $n$ -го уровня ИКС назначены адреса (например, MAC-адрес, TCP-порт, UDP-порт, IP-адрес и т. д.), которые могут быть как индивидуальные, так и групповые. В ТМБ это записывается следующим образом. Пусть  $a_l^{(n)}$  — адрес логического объекта (ЛО)  $n$ -го уровня;  $A_n = \{ \dots, a_l^{(n)}, \dots \}$  — множество адресов ЛО  $n$ -го уровня. Каждый ЛО  $n$ -го уровня ИКС принадлежит одной и только одной подсистеме  $n$ -го уровня. С другой стороны, одной подсистеме  $n$ -го уровня может принадлежать несколько ЛО  $n$ -го уровня. Формально это можно записать следующим образом:

$$\left( SS_n, A_n, B_n \right) \Leftrightarrow SS_n \xrightarrow{B_n} A_n, \quad (2)$$

где  $B_n = \{ \dots, b_k^{(n)}, \dots \}$  — подмножество множества пар  $b_k^{(n)} = \left( ss_l^{(n)}, a_j^{(n)} \right)$ , состоящих из адреса подсистемы  $n$ -го уровня и адреса ЛО  $n$ -го уровня, которые связаны указанным соответствием принадлежности.

Логическое соединение  $LC_{n-1,s,k}$  в ТМБ есть отношение между  $s$ -й декартовой степенью множества адресов ЛО  $n$ -го уровня и  $k$ -й декартовой степенью множества адресов ЛО этого же уровня, обеспечиваемое ближайшим нижним уровнем, что:

$$\left( A_n^{\times s}, A_n^{\times k}, LC_{n-1,s,k} \right) \Leftrightarrow A_n^{\times s} \xrightarrow{LC_{n-1,s,k}} A_n^{\times k}, \quad (3)$$

где  $LC_{n-1,s,k} = \{ \dots, lc_m^{(n-1,s,k)}, \dots \}$  — подмножество множества пар

$$lc_m^{(n-1,s,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, a_l^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n)}, \dots}_k \right) \right),$$

состоящих из кортежа адресов ЛО  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$  и кортежа адресов ЛО  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые взаимосвязаны с помощью рассмотренного отношения связности. Если истинно  $(s=1) \wedge (k=1)$ , то соответствие  $LC_{n-1,s,k}$  описывает логическое соединение «точка-точка», при истинности  $(s>1) \wedge (k=1)$  — «мно-

точка-точка»; при истинности  $(s = 1) \wedge (k > 1)$  — «точка-многоточка»; при истинности  $(s > 1) \wedge (k > 1)$  «многоточка-многоточка».

В ТМБ коммутационное соединение  $WC_{n,s,k}$  может быть записано как:

$$(A_n^{\times s}, A_n^{\times k}, WC_{n,s,k}) \Leftrightarrow A_n^{\times s} \xrightarrow{WC_{n,s,k}} A_n^{\times k}, \quad (4)$$

где  $WC_{n,s,k} = \{ \dots, wc_m^{(n,s,k)}, \dots \}$  — подмножество множества пар

$wc_m^{(n,s,k)} = \left( \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n)}, \dots}_s \right), \left( \underbrace{\dots, a_j^{(n)}, \dots}_k \right) \right)$ , представляющих собой кортеж адресов ЛО  $n$ -го уровня с числом компонентов  $s$  и кортежа адресов логических объектов  $n$ -го уровня с числом компонентов  $k$ , которые взаимоуязваны соответствующим отношением связности. Если истинно  $(s = 1) \wedge (k = 1)$ , то соответствие  $WC_{n,s,k}$  описывает коммутационное соединение «точка-точка»; при истинности  $(s > 1) \wedge (k = 1)$  — «многоточка-точка»; при истинности  $(s = 1) \wedge (k > 1)$  — «точка-многоточка»; а при  $(s > 1) \wedge (k > 1)$  — «многоточка-многоточка».

Аналогично по форме в рамках ТМБ описывается интерфейсное соединение  $IC_{n-1,s,k}$ , одношаговое  $SHC_{n-1,1,1}$ , многошаговое соединение «точка-точка»  $MHC_{n-1,k,1,1}$  [18] и маршрутизируемое соединение «точка-точка»  $RC_{n-1,hl,1,1}$ . Для последнего справедливо:

$$\begin{aligned} (A_n^{\times 1}, A_n^{\times 1}, RC_{n-1,hl,1,1}) &\Leftrightarrow A_n^{\times 1} \xrightarrow{RC_{n-1,hl,1,1}} A_n^{\times 1} = \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,1,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \\ &\left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,2,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,3,1,1}} A_n^{\times 1} \right) \cup \dots \cup \\ &\left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,hl,1,1}} A_n^{\times 1} \right) = \bigcup_{h=1}^{h=hl} \left( A_n^{\times 1} \xrightarrow{WC_{n,1,1} \circ MHC_{n-1,h,1,1}} A_n^{\times 1} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $hl$  — это предельное число шагов в многошаговом соединении,

$RC_{n-1,hl,1,1} = \{ \dots, rc_k^{(n-1,hl,1,1)}, \dots \}$  — подмножество множества пар адре-

сов логических объектов  $n$ -го уровня, которые состоят в отношении связности;  $MHC_{n-1,k,1,1}$  — подмножество множества пар адресов логических объектов многошагового соединения  $n$ -го уровня.

Термин ДСС в ТМБ определяется как множество маршрутов соединений «точка-точка» между ЛО с адресом  $a_i^{(n)}$   $n$ -го уровня и ЛО  $a_j^{(n)}$  того же уровня, сформированные на базе всех таблиц маршрутизации  $RT_{n,h}$  маршрутов «точка-точка» того же уровня, то есть:

$$v_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} = \left\{ \mu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h}, hl}^{(n)} \mid h \in H \right\}, \quad (6)$$

где  $\mu_{a_i^{(n)}, a_j^{(n)}, RT_{n,h}, hl}^{(n)}$  — маршрут «точка-точка» между ЛО с адресом  $a_i^{(n)}$   $n$ -го уровня и ЛО  $a_j^{(n)}$  того же уровня;  $H$  — множество параметров алгоритма маршрутизации.

Тогда множество ДСС между выделенной группой ЛО можно записать в виде формулы:

$$Y_n = \left\{ v_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} \mid (l \in I) \wedge (j \in I) \wedge (l \neq j) \wedge \left( (a_l^{(n)}, a_j^{(n)}) \notin WC_{n,1,1} \right) \right\} \quad (7)$$

Многополюсная сеть связи (МСС) трактуется в ТМБ как множество ДСС между заданной группой ЛО  $n$ -го уровня. Формальное представление МСС выглядит как:

$$w_{I_g, hl}^{(n)} = \left\{ v_{a_l^{(n)}, a_j^{(n)}, hl}^{(n)} \mid (l \in I_g) \wedge (j \in I_g) \wedge (l \neq j) \wedge \left( (a_l^{(n)}, a_j^{(n)}) \notin WC_{n,1,1} \right) \right\}, \quad (8)$$

где  $I_g \subseteq I$  — это подмножество множества всех номеров элементов множества  $A_n$ .

Формальное представление множества МСС между всеми ЛО  $n$ -го уровня целесообразно представить как

$$W_n = \left\{ w_{I_g, hl}^{(n)} \mid g \in G \right\}, \quad (9)$$

где  $G$  — это множество номеров заданных подмножеств множества  $A_n$ .

Таким образом, ТМБ обеспечивает универсальное представление подсистем, элементов, примитивов и существенных свойств ИКС, позволяет описать объект исследования и любую его часть (логическое, коммутационное, маршрутизируемое соединение (в том числе многоточечное), ДСС, МСС) в виде совокупности *множеств*, *взаимозавязанных системой соответствий* и *отношений*. Это оказывается особенно важным при моделировании ИКС, так как не позволяет манипулировать со свойствами логического объекта высшей иерархии без учета свойств логических объектов низшей иерархии.

**4. Система моделей иерархических многопутевых многоадресных ИКС.** Теоретико-множественный базис, представленный выше, по сути, является формальным языком *представления* ИКС. Однако сам по себе он не в состоянии служить инструментом математического описания зависимостей системных свойств объекта исследований от значений соответствующих управляемых характеристик. Представление таких зависимостей и составляет цель моделирования ИКС.

Предлагаемая *система моделей* отличается от существующих средств представления ИКС тем, что в разработанных формализмах осуществлен строгий математический переход от отношений и соответствий, введенных в рамках ТМБ, к описанию свойств объекта исследования, определяющих его целевое предназначение. Для этого используются методы теорий графов, надежности и массового обслуживания, модифицированные в направлении более полного учета многопутевости, многоадресности процедур маршрутизации и приоритетности обслуживания блоков данных различных пользователей.

Общая идея системы моделей состоит во взаимозавязанной декомпозиции общей задачи исследования в двух направлениях (рисунок 2):

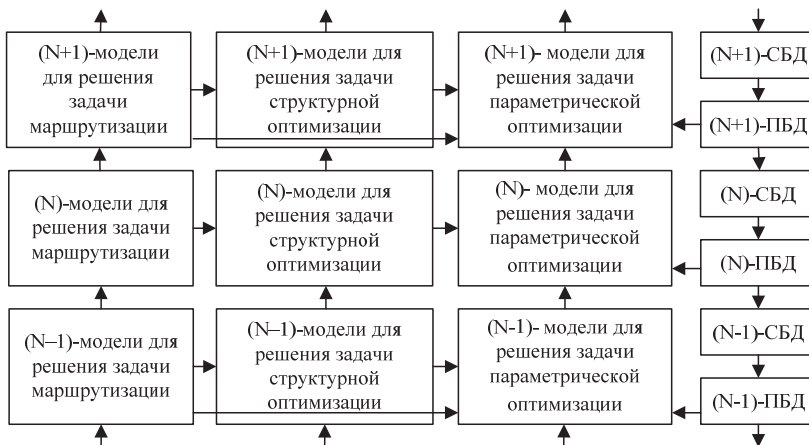


Рис. 2. Структура системы моделей иерархических многопутевых многоадресных ИКС



- слева-направо, по логике решения структурно-сетевых задач от моделирования к структурной и параметрической оптимизации;
- снизу-вверх, в соответствии с ходом процесса обслуживания примитивов в открытых системах (например, узле коммутации ИКС).

В связи с многоуровневостью и сложностью объекта исследований (разнообразием элементов и подсистем ИКС, процедур обслуживания блоков данных, целевых установок, предпроектных условий и проектных операторов), полученная система моделей также является сложной, многоуровневой и многооператорной. Это не позволяет ее исчерпывающее изложение в рамках одной статьи. Для примера ниже рассматривается задача моделирования только одного свойства ИКС — структурной надежности.

**5. Представление свойства структурной надежности ИКС в разработанных базисе и системе моделей.** Структурная надежность ИКС зависит от работоспособности элементов, образующих ее маршруты. Исходными данными для моделирования являются сведения об ИКС, полученные от заказчика и представленные средствами ТМБ.

Пусть множество состояний (работоспособное и неработоспособное) ИКС в ТМБ задается следующим образом  $ST = \{0, 1\}$ . Тогда состояние любого логического объекта — есть соответствие между множеством  $A_n$  и множеством состояний  $ST$  :

$$(A_n, ST, STA_n) \Leftrightarrow A_n \xrightarrow{STA_n} ST, \quad (10)$$

где  $STA_n = \{\dots, sta_l^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из двух элементов  $sta_l^{(n)} = (a_j^{(n)}, st_g)$ , включающих: адрес логического объекта  $n$ -го уровня  $a_j^{(n)}$  и его состояние  $st_g$ . Аналогично по форме в ТРБ записываются *состояния* соединений (логических  $STLC_{n-1,1,1,h}$ , коммутационных  $STWC_{n,1,1,g}$ , маршрутизируемых  $STM_{n,t}$ ), ДСС ( $STY_n$ ) и МСС ( $STW_n$ )  $n$ -го уровня.

Строгое формальное описание показателей надежности ИКС можно получить с использованием однородной *логической функции*, значения которой принадлежат множеству  $\{0, 1\}$  и аргументами которой также являются значения из множества  $\{0, 1\}$  [23]. Так, логическую функцию, связывающую состояния ЛО  $n$ -го уровня с состояни-

ями маршрутов (путей) «точка-точка»  $n$ -го уровня, целесообразно записать в виде соответствий:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{STA}_n, \mathbf{STLC}_{n-1,1,1}, \mathbf{STWC}_{n,1,1}, \mathbf{STM}_n, \mathbf{LFSTALCWCM}_n) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{STA}_n \times \mathbf{STLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{STWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{LFSTALCWCM}_n} \mathbf{STM}_n, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mathbf{STA}_n = \{\dots, STA_{n,l}, \dots\}$  — множество различных вариантов состояний логических объектов  $n$ -го уровня;  $\mathbf{STLC}_{n-1,1,1} = \{\dots, STLC_{n-1,1,1,h}, \dots\}$  — множество состояний логических соединений  $(n-1)$ -го уровня;  $\mathbf{STWC}_{n,1,1} = \{\dots, STWC_{n,1,1,g}, \dots\}$  — множество состояний коммутационных соединений  $n$ -го уровня;  $\mathbf{STM}_n = \{\dots, STM_{n,t}, \dots\}$  — множество состояний маршрутов соединений  $n$ -го уровня;  $\mathbf{LFSTALCWCM}_n = \{\dots, lfstalcwcm_q^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из четырех элементов  $lfstalcwcm_q^{(n)} = (STA_{n,l}, STLC_{n-1,1,1,h}, STWC_{n,1,1,g}, STM_{n,t})$ , включающих: состояния логических объектов  $n$ -го уровня  $STA_{n,l}$ , состояния логических соединений  $(n-1)$ -го уровня  $STLC_{n-1,1,1,h}$ , состояния коммутационных соединений  $n$ -го уровня  $STWC_{n,1,1,g}$  и состояния маршрутов соединений  $n$ -го уровня  $STM_{n,t}$ , взаимосвязанных с помощью соответствующего соответствия.

По аналогии с вышеизложенным в ТМБ можно представить логическую функцию  $\mathbf{LFSTMY}_n$ , связывающую состояния маршрутов соединений «точка-точка»  $n$ -го уровня с состояниями ДСС  $n$ -го уровня, а также логическую функцию  $\mathbf{LFSTYW}_n$ , связывающую состояния ДСС  $n$ -го уровня с состояниями МСС  $n$ -го уровня.

Множество вероятностей работоспособного состояния (ВРС) в ТРБ определяется следующим образом:

$$PR = \{pr \mid (pr \in \mathbf{R}) \wedge (0 \leq pr \leq 1)\}. \quad (12)$$

где  $\mathbf{R}$  — множество вещественных чисел.

Отсюда ВРС логического объекта можно определить как соответствие между заданным выше множеством  $A_n$  и множеством  $PR$  :

$$(A_n, PR, PRA_n) \Leftrightarrow A_n \xrightarrow{PRA_n} PR. \quad (13)$$

где  $PRA_n = \{\dots, pra_i^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из двух элементов  $pra_i^{(n)} = (a_j^{(n)}, pr_g)$ , включающих адрес логического объекта  $n$ -го уровня  $a_j^{(n)}$  и его ВРС  $pr_g$ . Аналогично по форме в ТМБ представляются ВРС соединений (логического  $PRLC_{n-1,s,k}$ , коммутационного  $PRWC_{n,s,k}$ , маршрутизируемого  $PRM_n$ ), ДСС ( $PRY_n$ ) и МСС ( $PRW_n$ )  $n$ -го уровня.

В разрабатываемой системе моделей под *вероятностной* функцией далее понимается вероятность истинности логической функции [23]. Так, вероятностную функцию, связывающую ВРС ЛО  $n$ -го уровня с ВРС маршрутов «точка-точка»  $n$ -го уровня, целесообразно записать в виде соответствий:

$$\begin{aligned} (\mathbf{PRA}_n, \mathbf{PRLC}_{n-1,1,1}, \mathbf{PRWC}_{n,1,1}, \mathbf{PRM}_n, \mathbf{PRALCWC}_n) &\Leftrightarrow & (14) \\ &\Leftrightarrow \mathbf{PRA}_n \times \mathbf{PRLC}_{n-1,1,1} \times \mathbf{PRWC}_{n,1,1} \xrightarrow{\mathbf{PRALCWC}_n} \mathbf{PRM}_n, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{PRA}_n = \{\dots, PRA_{n,l}, \dots\}$  — множество различных вариантов ВРС логических объектов  $n$ -го уровня;  $\mathbf{PRLC}_{n-1,1,1} = \{\dots, PRLC_{n-1,1,1,h}, \dots\}$  — множество ВРС логических соединений  $(n-1)$ -го уровня;  $\mathbf{PRWC}_{n,1,1} = \{\dots, PRWC_{n,1,1,g}, \dots\}$  — множество ВРС коммутационных соединений «точка-точка»  $n$ -го уровня;  $\mathbf{PRM}_n = \{\dots, PRM_{n,t}, \dots\}$  — множество ВРС маршрутов соединений  $n$ -го уровня;  $\mathbf{PRALCWC}_n = \{\dots, pralcwcm_q^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из четырех элементов  $pralcwcm_q^{(n)} = (PRA_{n,l}, PRLC_{n-1,1,1,h}, PRWC_{n,1,1,g}, PRM_{n,t})$ , включающих: ВРС логических объектов  $n$ -го уровня  $PRA_{n,l}$ , ВРС логических соединений  $(n-1)$ -го уровня  $PRLC_{n-1,1,1,h}$ , ВРС коммутационных соеди-

нений  $n$ -го уровня  $PRWC_{n,1,g}$  и ВРС маршрутов соединений  $n$ -го уровня  $PRM_{n,l}$ , взаимосвязанных с помощью заданного соответствия.

Аналогично по форме записывается вероятностная функция  $PRMY_n$ , связывающая ВРС маршрутов с ВРС ДСС, и вероятностная функция  $PRYW_n$ , связывающая ВРС ДСС связи с ВРС МСС.

Результатом анализа устойчивости (надежности, живучести) ИКС должно стать получение количественных значений требуемых показателей. Для этого далее предлагается использовать логические функции, допускающие непосредственный переход к вероятностным функциям путем замены всех логических переменных соответствующими вероятностями, а всех логических операций соответствующими арифметическими операциями. Такие логические функции называются формами перехода к полному замещению [23]. В предметной области применяется целый ряд форм перехода к полному замещению, однако далее предлагается остановиться на *ортогональной дизъюнктивной нормальной форме* (ОДНФ). Преобразование логической функции в ортогональную дизъюнктивную нормальную форму далее называется *ортогонализацией* [23]. При этом полное замещение понимается как преобразование ОДНФ в вероятностную функцию.

С учетом введенных в ТМБ формализмов ортогонализация с последующим полным замещением — это соответствие между рассмотренными выше логическими и вероятностными функциями:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{LFSTALCWCW}_n, \mathbf{PRALCWCW}_n, \mathbf{ORLFSTPRALCWCW}_n) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTALCWCW}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRALCWCW}_n} \mathbf{PRALCWCW}_n, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & (\mathbf{LFSTMY}_n, \mathbf{PRMY}_n, \mathbf{ORLFSTPRMY}_n) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTMY}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRMY}_n} \mathbf{PRMY}_n, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & (\mathbf{LFSTYW}_n, \mathbf{PRYW}_n, \mathbf{ORLFSTPRYW}_n) \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \mathbf{LFSTYW}_n \xrightarrow{\mathbf{ORLFSTPRYW}_n} \mathbf{PRYW}_n, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\mathbf{LFSTALCWCW}_n = \{\dots, \mathbf{LFSTALCWCW}_{n,l}, \dots\}$  — множество вариантов логической функции связывающей состояния логических объектов  $n$ -го уровня, логических соединений  $(n-1)$ -го уровня, коммутационных соединений  $n$ -го уровня с состояниями маршрутов соедине-

ний  $n$ -го уровня;  $\mathbf{PRALCWCM}_n = \{\dots, PRALCWCM_{n,j}, \dots\}$  — множество вероятностной функции, связывающей ВРС логических объектов  $n$ -го уровня, ВРС логических соединений  $(n-1)$ -го уровня, ВРС коммутационных соединений  $n$ -го уровня с ВРС маршрутов соединений  $n$ -го уровня;  $\mathbf{LFSTMY}_n = \{\dots, LFSTMY_{n,l}, \dots\}$  — множество логической функции, связывающей состояния маршрутов соединений  $n$ -го уровня с состояниями ДСС  $n$ -го уровня;  $\mathbf{PRMY}_n = \{\dots, PRMY_{n,j}, \dots\}$  — множество вероятностной функции, связывающей ВРС маршрутов соединений  $n$ -го уровня с ВРС двухполюсных сетей связи;  $\mathbf{LFSTYW}_n = \{\dots, LFSTYW_{n,l}, \dots\}$  — множество логической функции, связывающей состояния ДСС  $n$ -го уровня с состояниями МСС;  $\mathbf{PRYW}_n = \{\dots, PRYW_{n,l}, \dots\}$  — множество вероятностной функции, связывающей ВРС двухполюсных сетей связи с ВРС многополюсных сетей связи;

$\mathbf{ORLFSTPRALCWCM}_n = \{\dots, orlfstpralcwcm_k^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из двух элементов  $orlfstpralcwcm_k^{(n)} = (LFSTALCWCM_{n,l}, PRALCWCM_{n,j})$ , включающих: логическую функцию, связывающую состояния логических объектов  $n$ -го уровня, логических соединений  $(n-1)$ -го уровня, коммутационных соединений  $n$ -го уровня с состояниями маршрутов соединений  $n$ -го уровня и вероятностную функцию, связывающую ВРС логических объектов  $n$ -го уровня, ВРС логических соединений  $(n-1)$ -го уровня, ВРС коммутационных соединений  $n$ -го уровня с ВРС маршрутов соединений «точка-точка»  $n$ -го уровня;

$\mathbf{ORLFSTPRMY}_n = \{\dots, orlfstprmy_k^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из двух элементов  $orlfstprmy_k^{(n)} = (LFSTMY_{n,l}, PRMY_{n,j})$ , включающих: логическую функцию, связывающую состояния маршрутов соединений  $n$ -го уровня с состояниями ДСС  $n$ -го уровня, и вероятностную функцию, связывающую ВРС маршрутов соединений  $n$ -го уровня с ВРС ДСС  $n$ -го уровня;

$\mathbf{ORLFSTPRYW}_n = \{\dots, orlfstpryw_k^{(n)}, \dots\}$  — подмножество множества кортежей из двух элементов

$orlfstpryw_k^{(n)} = (LFSTYW_{n,l}, PRYW_{n,j})$ , включающих: логическую функцию, связывающую состояния ДСС с состояниями МСС и вероятностную функцию связывающую ВРС ДСС с вероятностью работоспособного состояния МСС.

Для практического нахождения значений  $ORLFSTPRALCWCМ_n$ ,  $ORLFSTPRMY_n$  и  $ORLFSTPRYW_n$  можно воспользоваться соответствием:

$$FR \subseteq Z_1 \times Z_2 \Leftrightarrow (Z_1, Z_2, FR) \Leftrightarrow Z_1 \xrightarrow{FR} Z_2 \Leftrightarrow FR : Z_1 \rightarrow Z_2. \quad (18)$$

где:

$$Z_1 = \left\{ \left\{ \dots, \overline{\hat{x}}_s, \dots \right\}, \left\{ \dots, \hat{x}_s, \dots \right\}, \wedge, \vee \right\},$$

$$Z_2 = \left\{ \left\{ \dots, p(\overline{\hat{x}}_s), \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\hat{x}_s), \dots \right\}, \times, + \right\},$$

$$FR = \left\{ \left\{ \left\{ \dots, \overline{\hat{x}}_s, \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\overline{\hat{x}}_s), \dots \right\} \right\}, \left\{ \left\{ \dots, \hat{x}_s, \dots \right\}, \left\{ \dots, p(\hat{x}_s), \dots \right\} \right\}, (\wedge, \times), (\vee, +) \right\},$$

где  $p(\overline{\hat{x}}_s)$  — вероятность нахождения  $s$ -го элемента ИКС в работоспособном состоянии, то есть  $p(\hat{x}_s = 1)$ ;  $p(\hat{x}_s)$  — вероятность нахождения  $s$ -го элемента ИКС в неработоспособном состоянии,  $p(\hat{x}_s = 0)$ .

**6. Логическая функция логического сочетания.** В существующих подходах ИКС декомпозируется (как правило, эвристически) на направления связи (ДСС), что значительно огрубляет модельные возможности ТМБ. Следовательно, узловым моментом моделирования в данной ситуации является необходимость строгого математического задания *условий работоспособности* ИКС, в которой планируется одновременная организация *нескольких* многоадресных многопутевых физических и логических соединений (виртуальных каналов, туннелей, VPN). В разрабатываемом подходе предлагается использовать новую логическую функцию *логического сочетания* в виде [13]:

$$(x_1, x_2, \dots, x_n)^{(m)}. \quad (19)$$

Новая логическая функция определяет следующую процедуру: логическое сочетание  $n$  логических переменных по  $m$  равно единице, тогда и только тогда, когда число логических переменных, равных единице, равно  $m$  или более.

Логике работы этой функции можно наглядно продемонстрировать на примере одной, двух и трех переменных:

$$\begin{aligned}(x_1)^{(0)} &= 1, (x_1)^{(1)} = x_1, (x_1)^{(2)} = 0, (x_1, x_2)^{(0)} = 1, (x_1, x_2)^{(3)} = 0, \\(x_1, x_2)^{(1)} &= x_1 \vee x_2, (x_1, x_2)^{(2)} = x_1 \wedge x_2, \\(x_1, x_2, x_3)^{(0)} &= 1, (x_1, x_2, x_3)^{(1)} = x_1 \vee x_2 \vee x_3, \\(x_1, x_2, x_3)^{(2)} &= (x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3) \vee (x_2 \wedge x_3), \\(x_1, x_2, x_3)^{(3)} &= x_1 \wedge x_2 \wedge x_3, (x_1, x_2, x_3)^{(4)} = 0.\end{aligned}$$

Функция отрицания при этом может быть представлена выражением  $(x_1)^{(2 \cdot x_1)} = \overline{x_1}$ , где  $(2 \cdot x_1)$  — это арифметическое произведение, а именно  $2 \cdot 0 = 0$ ,  $2 \cdot 1 = 2$ .

Видно, что на основе предложенной функции *логического сочетания* имеется возможность представить все базовые функции одной и двух логических переменных, такие как конъюнкцию, отрицание и дизъюнкцию. Это свидетельствует о том, что наряду с функциями «штрих Шеффера» и «стрелка Пирса» функция *логического сочетания* может применяться для формализации любой логической функции одного и двух независимых логических переменных.

Аналитическое выражение для нахождения дизъюнктивной нормальной формы любого логического сочетания для  $0 < m \leq n$  целесообразно записать в виде:

$$\begin{aligned}&(x_1, x_2, \dots, x_n)^{(m)} = \\&= \bigvee_{i_{m-1}=1}^{n-[m-1]} x_{i_{m-1}} \wedge \left[ \bigvee_{i_{m-2}=i_{m-1}+1}^{n-[m-2]} x_{i_{m-2}} \wedge \left[ \dots \wedge \left[ \bigvee_{i_{m-m}=i_{m-m+1}+1}^{n-[m-m]} x_{i_{m-m}} \dots \right] \right] \right].\end{aligned}\quad (20)$$

Видно, что с помощью выражения (20) появляется возможность осуществить формальное описание ИКС в ситуации, когда условия работоспособности системы представляются как в форме дизъюнкции  $m$  маршрутов, так и в форме дизъюнкции  $m$  кратчайших циклов, остовных деревьев и других типов подграфов [18].

**7. Исследование структурной надежности ИКС с заданной узловой основой.** Пусть задана узловая основа ИКС, включающая 6 узлов (рисунок 3а). В исследуемой ИКС в первом приближении предполагается функционирование пяти направлений связи (ДСС), связывающих следующие пары корреспондирующих узлов: (1, 2),

(3, 2), (4, 2), (5, 2) и (6, 2). Кроме того, в ИКС предусмотрено предоставление *многоточечных* сервисов с топологиями *дерево*, *цепь* и *кольцо* от любого из этих узлов.

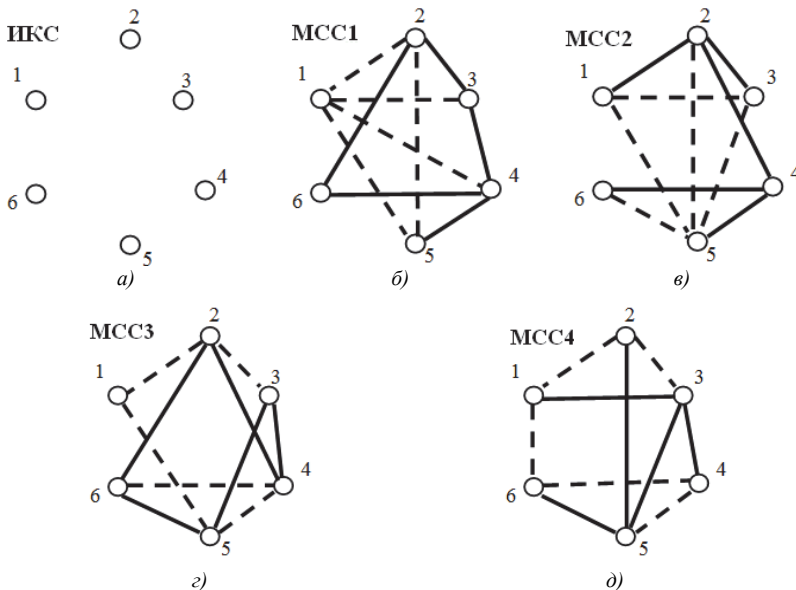


Рис. 3. Графовые модели исследуемых ИКС: а) исходная узловая основа; б) композиция ДСС; в) композиция остовных деревьев; г) композиция цепей; д) композиция циклов

В организации ИКС предполагается использование ресурса от двух операторов связи, каналы которых имеют разные ВРС: у первого — 0,997 (пунктирные линии), у второго — 0,999. *Заказчик требует* обеспечить ВРС системы в целом не хуже 0,9999.

Пусть МСС считается работоспособной, если работоспособны все ДСС, ее образующие. В свою очередь каждая ДСС работоспособна, если работоспособен хотя бы один маршрут из двадцати кратчайших маршрутов успешного функционирования (КМУФ) [25], связывающих соответствующую вершину-исток с вершиной-сток. Очевидно, что наилучшие показатели структурной надежности будут у полностью связанной ИКС, однако такое решение является затратным. В ходе моделирования были исследованы вероятности работоспособного состояния МСС для различных вариантов ее более дешевого (неполнодоступного) формирования из каналов (трактов) обоих операторов:

– для стандартного — композиции из двухполюсных сетей связи (МСС1, рисунок 3б);



– вновь предлагаемых — из остовных деревьев (МСС2, рисунок 3в), гамильтоновых цепей (МСС3, рисунок 3е) или циклов (МСС4, рисунок 3д).

Результаты моделирования представлены на рисунках 4а и б. На основе метода ветвей и границ [26] для исходного полносвязного графа решена задача распределения ресурса, включающего: пять ребер с коэффициентом готовности 0,999, пять ребер с коэффициентом готовности 0,997 и пять ребер с коэффициентом готовности 0 (ребра с коэффициентом готовности 0 на графах рисунка 3 не показаны). Цель решения — максимизация вероятности работоспособного состояния МСС, рассчитываемую с помощью логической функции связности в ОДНФ (см. п. 5 настоящей статьи).

На рисунке 4а показаны результаты анализа МСС1 (рисунок 3б), являющейся композицией ДСС. Структурная надежность синтезированного графа оценивалась по следующим четырем параметрам:

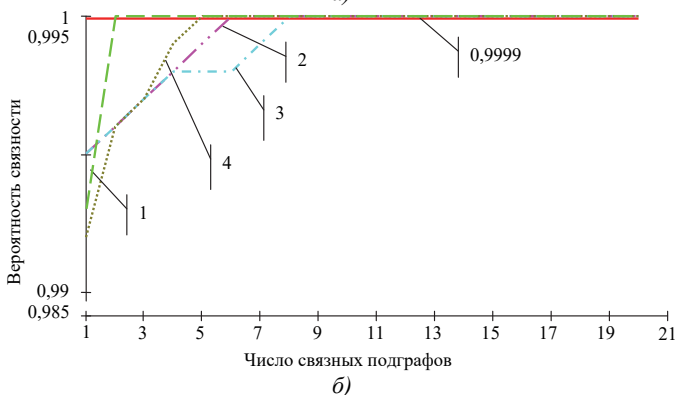
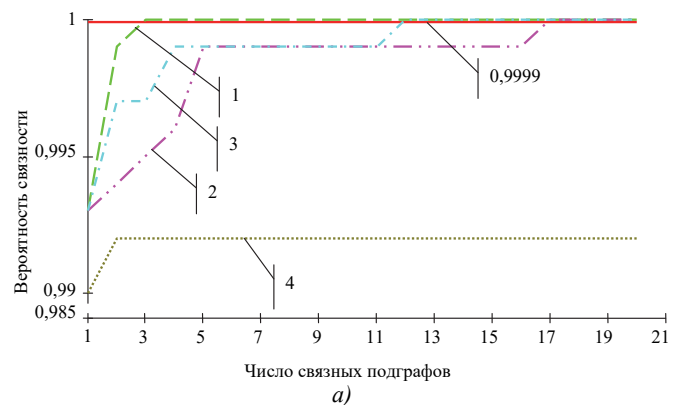


Рис. 4. Исследование графовых моделей ИКК: а) МСС1; б) МСС4

1) вероятность нахождения в работоспособном состоянии хотя бы одного маршрута из  $m$  КМУФ для каждой из заданных пяти ДСС;

2) вероятность нахождения в работоспособном состоянии хотя бы одного остонового дерева из  $m$  минимальных (кратчайших) остовных деревьев;

3) ВРС хотя бы одного гамильтонова маршрута из  $m$  кратчайших гамильтоновых маршрутов;

4) ВРС хотя бы одного гамильтонова цикла из  $m$  кратчайших гамильтоновых циклов.

При этом учитывается, что по требованию заказчика вероятность нахождения МСС в работоспособном состоянии для всех четырех параметров должна быть не хуже, чем 0,9999.

Видно, что при формировании ИКС из ДСС, выполнение требований по надежности к многоточечным соединениям возможно только с дополнительными затратами ресурсов.

Результаты анализа МСС4 (рисунок 3д), представленные на рисунке 4б, свидетельствуют о том, что наиболее надежные топологии многоточечных соединений физических и логических каналов в ходе проектирования ИКС могут быть получены путем представления МСС в виде композиции *гамильтоновых циклов*, а не ДСС. Из примера следует, что расчет параметров надежности ИКС в рамках разработанного подхода предполагает последовательное (по иерархии системы) применение функций работоспособности в порядке: маршрут, двухполюсная и многополюсная сеть связи. То есть в ходе анализа исследователь получает сведения не только о надежности всей системы, но и о вкладе каждого элемента в это значение.

Таким образом, в рамках предложенных ТМБ и системы моделей осуществляется строгий математический переход от исходных данных к количественным значениям системных свойств ИКС.

**8. Общая характеристика моделей, применяемых для решения задач параметрической оптимизации ИКС.** В отличие от используемых для структурной оптимизации ИКС, данная группа моделей (рисунок 2) опирается на теоретико-множественное представление *процедур* обслуживания блоков данных в КМУФ, ДСС и МСС. Так соответствие между множеством блоков данных и множеством моментов времени записывается в виде:

$$\left( PDU_n, T, FPDU_n \right) \Leftrightarrow PDU_n \xrightarrow{FPDU_n} T, \quad (21)$$

где:

$$FPDU_n = \left\{ \dots, fpdu_m^{(n)}, \dots \right\}, \quad fpdu_m^{(n)} = \left( pdu_l^{(n)}, t_j \right),$$

а множество моментов времени:

$$T = \{t_j \mid (t_j \in \mathbf{R}) \wedge (t_j \geq 0)\}. \quad (22)$$

Аналогично по форме осуществляется запись вариантов и вероятности обслуживания потоков блоков данных элементами ИКС, зависящих от свободности, занятости и/или работоспособности последних. Процесс моделирования при этом основан на композиции инструментария открытых сетей Джексона и метода множителей Лагранжа [18, 27, 28, 29]. От существующих формализмов он отличается тем, что процесс обслуживания блоков данных логическим или физическим каналами описывается смесью вероятностно-временных характеристик независимо функционирующих систем массового обслуживания.

Исследования показали, что задавшись тем или иным показателем качества обслуживания можно формализовать качество обслуживания отдельным элементом ИКС, маршрутом, ДСС и ИКС в целом. При этом ТМБ обеспечивает формальный переход к существующим и вновь разработанным моделям теории массового обслуживания [18, 27], фракталов и др.

Так, например, в ходе применения рассмотренных выше моделей на серии графов рисунка 3, была выявлена следующая закономерность. Повысить *эффективность обслуживания трафика данных* в многоадресных многопутевых ИКС можно путем формирования МСС в виде композиции гамильтоновых циклов. По сравнению с существующим принципом декомпозиции ИКС на ДСС, выигрыш может составить величину порядка 15-20%, что достигается за счет уменьшения числа альтернативных путей доставки информации.

Таким образом, представленная система моделей многоадресных многопутевых ИКС позволяет получать результаты, важные для практики проектирования современных информационных инфраструктур. Разработанные формализмы, в отличие от существующих, учитывают возможность предоставления услуг типа «точка-многоточка», «многоточка-точка», «многоточка-многоточка», в том числе в условиях приоритетности блоков данных в современных ИКС.

**9. Заключение.** Рассмотренные ТМБ и система математических моделей ИКС в теоретическом смысле являются дальнейшим развитием методологии многоуровневых иерархических систем [17, 18]. Разрабатываемый подход отличается от традиционного тем, что вводимые в ТМБ отношения и соответствия конкретизируются в системе моделей с помощью модифицированных методов теорий графов, надежности и массового обслуживания, учитывающих иерархичность, много-

путевость, многоадресность процедур маршрутизации. Вычислительные эксперименты показали, что использование предлагаемых формализмов, оперирующих сегментами типа цепь, звезда, кольцо и дерево, а не только ДСС, позволяет при прочих равных условиях обеспечить повышение достижимых характеристик эффективности обслуживания трафика и структурной надежности этой системы.

Направлениями дальнейших исследований является разработка прагматических (в том числе инженерных) методов структурно-параметрической оптимизации многоуровневых многоадресных и многопутевых ИКС с эффективным использованием возросших вычислительных мощностей современных вычислительных средств. При этом рассмотренный выше ТМБ должен стать основой нового формального способа машинного представления элементов ИКС и процессов, протекающих в ней.

Перспективными направлениями применения разработанного в статье инструментария являются:

- моделирование и оптимизация числа полос движения транспорта на сети автодорог федерального и внутризонального (регионального) значения на основе требуемого уровня надежности;
- моделирование и оптимизация социально-ориентированных инфокоммуникационных систем с учетом уровня восприятия сервисов связи и информационных услуг;
- формализация процессов в газотранспортной сети древовидной структуры, управляемой средствами телемеханики, в том числе международных;
- моделирование нефтепроводных сетей сложных структур с кольцевыми сегментами, в том числе международных;
- моделирование и анализ надежности электроэнергетических систем федерального и внутризонального (регионального) значения;
- моделирование и анализ устойчивости междоменных связей программно-конфигурированных сетей.

### **Литература**

1. *Жарикова В. О.* Анализ эффективности функционирования методов многоадресной маршрутизации в мультисервисных сетях связи // Вестник СибГУТИ. 2011. № 3. С. 98–104.
2. *Жарикова В. О., Новиков С. Н.* Математическая модель анализа многоадресной маршрутизации в мультисервисной сети связи: часть 2 // Доклады ТУСУР. 2012. № 1(25). С. 92–95.
3. *Лемешко А.В., Вавенко Т.В.* Разработка и исследование потоковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с балансировкой нагрузки // Доклады ТУСУР. 2013. № 3(29). С. 100–108.

4. *Шувалов В.П., Вараксина И.Ю.* Классификация методов многопутевой маршрутизации // Т-Comm. 2014. № 1. С. 29–32.
5. *Козан А.В.* Организация многопутевой междоменной маршрутизации с оптимальным числом граничных маршрутизаторов // Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка. К.: Век+. 2013. № 59. С. 111–115.
6. *Барсков А.* Говорим WAN, подразумеваем VPN // Журнал сетевых решений LAN. 2010. № 06. URL: <http://www.osp.ru/lan/2010/06/13002982/> (дата обращения: 10.12.2016).
7. *Семенов Ю.В.* Проектирование сетей связи следующего поколения // Спб.: Наука и Техника. 2005. 240 с.
8. *Алиев Т.И.* Основы проектирования систем // С-Пб.: Университет ИТМО. 2015. 120 с.
9. *Лохмотко В.В.* Модели и методы оптимизации структуры телекоммуникационных сетей: диссертация д-ра техн. наук // СПб.: СПбГУТ. 1998. 290 с.
10. *Вавенко Т.В., Стерин В.Л., Симоненко А.В.* Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4(86). С. 38–45.
11. *Будко П.А. и др.* Расчет пропускной способности каналов инфокоммуникационной системы при нечетко заданных параметрах информационных потоков // Инфокоммуникационные технологии. 2007. Том 5. № 3. С. 45–49.
12. *Ромашкова О.Н., Яковлев Р.И.* Анализ моделей и методов для оценки живучести инфокоммуникационных сетей в условиях чрезвычайных ситуаций // Т-Comm. 2012. № 7. С.165–170.
13. *Захаров Г.П.* Методы исследования сетей передачи данных // М.: Радио и связь. 1982. 208 с.
14. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование сложных систем // М.: Высшая школа. 2001. 343 с.
15. *Лежков К.Е.* Моделирование методики оценки изменения качества информационного обмена в инфокоммуникационной системе специального назначения // Н&ES: Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли. 2013. № 2. С. 44–51.
16. *Барабанова Е.А., Береснев И.А.* Дискретное имитационное моделирование алгоритма организации очереди в буфере маршрутизатора // Научный вестник НГТУ. 2015. Том 58. № 1. С. 135–147.
17. *Mesarovic M., Macko D., Takahara Y.* Hierarchical Multilevel Systems Theory // Academic Press. New York. 1970. 344 p.
18. *Трегубов Р.Б., Саитов И.А.* Теоретические основы анализа и оптимизации иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем // Орел: Академия ФСО России. 2017. 585 с.
19. *Сотников А.Д., Катасонова Г.Р.* Модели прикладных и социально-ориентированных инфокоммуникационных систем // Фундаментальные исследования. 2015. № 2. С. 6070–6077.
20. *Филин Б.П.* Методы анализа структурной надежности сетей связи // М.: Радио и связь. 1988. 208 с.
21. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель // М.: Стандартинформ. 2006. 58 с.
22. *Шрейдер Ю.А.* Равенство, сходство, порядок // М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "НАУКА". 1971. 254 с.
23. *Рябинин И.А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем // СПб.: Политехника. 2000. 248 с.

24. *Трегубов Р.Б.* Композиционный метод исследования надежности иерархических многоуровневых маршрутизирующих систем // Научно-технический вестник ИТМО. 2016. № 5. С. 879–892.
25. *Трегубов Р.Б., Орешин А.Н., Алексиков Ю.Г.* Алгоритм нахождения  $k$  кратчайших путей // Телекоммуникации. 2013. № 6. С. 10–15.
26. *Martello S., Toth P.* Knapsack problems: algorithms and computer implementations // John Wiley & Sons Ltd. 1990. 296 с.
27. *Tregubov R.B., Saitov I.A., Korolev A.V.* Methods of Optimization of Characteristics in Small and Medium Connectivity Data Transmission Networks // Telecommunications and Radio Engineering. 2009. vol. 68. pp. 167–179.
28. *Трегубов Р.Б., Мясин Н.И., Мясин К.И.* Оптимизация скоростей передачи битового потока в каналах транспортной сети связи с коммутацией пакетов, обеспечивающая максимум вероятности своевременной доставки протокольных блоков данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 2 С. 34–40.
29. *Кокорева Е.В.* Методы анализа сетей массового обслуживания для оценки показателей качества в сетях связи // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT–2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч.1. Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: ПВГУС. 2016. С. 302–307.

**Трегубов Роман Борисович** — к-т техн. наук, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 61. treba@list.ru; ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)54-9731.

**Сайтов Игорь Акрамович** — д-р техн. наук, профессор, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, теория множеств, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях, анализ и синтез волоконно-оптических транспортных сетей. Число научных публикаций — 170. Akramovish@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034, РФ; р.т.: +7(4862)549801.

**Сайтов Сергей Игоревич** — сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: теория графов, теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Число научных публикаций — 8. serg-saitov@yadex.ru; ул. Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)54-9731.

R.B. TREGUBOV, I.A. SAITOV, S.I. SAITOV  
**ELEMENTS OF THE SET-THEORETIC BASE AND SYSTEM OF  
 MODELS OF MULTIPATH MULTI-ADDRESS  
 INFOCOMMUNICATION SYSTEMS**

---

*Tregubov R.B., Saitov I.A., Saitov S.I. Elements of the Set-Theoretic base and System of Models of Multipath Multi-Address Infocommunication Systems.*

**Annotation.** In the article we propose a new approach to simulation and design of infocommunication systems, in which hierarchical multi-level routing is provided. We have considered the elements of a set-theoretic base and a system of models of infocommunication system handling not only traditional model elements – bipolar communication networks, – but also the multiple segments such as a circuit, a star, a ring and a tree. Using the provisions of the theory of sets, the basic concepts and procedures of a reference interaction model of open system are put in compliance with mathematical objects providing the strict formal description of the infocommunication system, in which multipath multi-address physical and logical connections "point-to-multipoint", "multipoint-to-point", "multipoint-to-multipoint" are implemented. Constructability, visualization and systematicity of the developed approach are shown through the example of simulation of the structural reliability property of a specific infocommunication system.

**Keywords:** infocommunication system, multipoint connections, multiple multipath routing, simulation, set-theoretic base, structural and parameter optimization.

---

**Tregubov Roman Borisovich** — Ph.D., researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 61. [treba@list.ru](mailto:treba@list.ru); 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

**Saitov Igor' Akramovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, queueing theory, probability theory, set theory, application of mathematical model approaches in telecommunications, analysis and synthesis fiber transport networks. The number of publications — 170. [Akramovich@mail.ru](mailto:Akramovich@mail.ru); 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549801.

**Saitov Sergey Igorevich** — researcher, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: graph theory, waiting theory, probability theory, application of mathematical model approaches in telecommunications. The number of publications — 8. [serg-saitov@yadex.ru](mailto:serg-saitov@yadex.ru); 35, Priborostroitel'naya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)54-9731.

## References

1. Zharikova V.O. [The analysis of efficiency of functioning of methods of multiple routing in multiservice communication networks]. *Vestnik SibGUTI – Vestnik SibGUTI*. 2011. vol. 3. pp. 98–104. (In Russ.).
2. Zharikova V.O., Novikov S.N. [Mathematical model of the analysis of multiple routing in a multiservice communication network: part 2]. *Doklady TUSUR – Proceedings of TUSUR University*. 2012. vol. 1(25). pp. 92–95. (In Russ.).

3. Lemesheko A.V., Vavenko T.V. [Development and research of stream model of the adaptive routing on the software defined networks with balancing of loading]. *Doklady TUSUR – Proceedings of TUSUR University*. 2013. vol. 3(29). pp. 100–108. (In Russ.).
4. Shuvalov V.P., Varaksina I.Yu. [Classification of methods of multipath routing]. *T-Comm*. 2014. vol. 1. pp. 29–32. (In Russ.).
5. Kogan A. V. [The organization of multipath interdomain routing with optimum number of boundary routers]. *Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. Kiev: Vek+. 2013. vol. 59. pp. 111–115. (In Russ.).
6. Barskov A. [Talk WAN, mean VPN]. *Journal of LAN networking solutions*. Available at: <http://www.osp.ru/lan/2010/06/13002982/> (accessed: 10.12.2016). (In Russ.).
7. Semenov Yu.V. *Proektirovanie setey svyazi sleduyushchego pokoleniya* [Designing a new generation networks]. Spb.: Nauka i Tehnika. 2005. 240 p. (In Russ.).
8. Aliev T.I. *Osnovy proektirovaniya sistem* [Fundamentals of systems design]. SPb.: Universitet ITMO. 2015. 120 p. (In Russ.).
9. Lohmotko V.V. *Modeli i metody optimizatsii struktury telekommunikatsionnykh setey: dissertatsiya d-ra tehn. nauk* [Models and methods of optimization of structure of telecommunication networks: doctoral thesis]. SPb.: SPbGUT. 1998. 290 p. (In Russ.).
10. Vavenko T.V., Sterin V.L., Simonenko A.V. [Stream model of routing with balancing of loading on queue length on the software defined networks]. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2013. vol. 4(86). pp. 38–45. (In Russ.).
11. Budko P.A. et al. [Calculation of throughput of channels of infocommunication system in case of indistinct given parameters of information flows]. *Infokommunikatsionnyye tekhnologii – Infocommunication technologies*. 2007. vol. 5. no. 3. pp. 45–49. (In Russ.).
12. Romashkova O.N., Yakovlev R.I. [The analysis of models and methods for assessment of survivability of infocommunication networks in the conditions of emergency situations]. *T-Comm*. 2012. vol. 7. pp. 165–170. (In Russ.).
13. Zakharov G.P. *Metody issledovaniya setey peredachi dannykh* [Methods of research data networks]. M.: Radio i svyaz'. 1982. 208 p. (In Russ.).
14. Sovetov B.Ya., Jakovlev S.A. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems]. M.: Vysshaya shkola. 2001. 343 p. (In Russ.).
15. Legkov K.E. [Simulation of a technique of assessment of change of quality of information exchange in infocommunication system of a special purpose]. *H&ES: Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh zemli – H&ES: High tech in earth space research*. 2013. vol. 2. pp. 44–51. (In Russ.).
16. Barabanova E.A., Beresnev I.A. [The discrete simulation modeling of an algorithm of the organization of queue in the router buffer]. *Nauchnyy vestnik NGTU – Science bulletin of NSTU*. 2015. Issue 58. vol. 1. pp. 135–147. (In Russ.).
17. Mesarovic M., Macko, D., Takahara, Y. *Hierarchical Multilevel Systems Theory*. Academic Press. 1970. 344 p.
18. Tregubov R.B., Saitov I.A. *Teoreticheskie osnovy analiza i optimizatsii ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh marshrutiziruyushchikh sistem* [Theoretical bases of the analysis and optimization of the hierarchical multilevel routing systems]. Orel: Akademiya FSO Rossii. 2016. 585 p. (In Russ.).
19. Sotnikov A.D., Katasonova G.R. [Models of application-oriented and socially oriented infocommunication systems]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental research*. 2015. vol. 2. pp. 6070–6077. (In Russ.).



20. Filin B.P. *Metody analiza strukturnoj nadezhnosti setej svyazi* [Methods of the analysis of structural reliability of communication networks]. M.: Radio i svjaz'. 1988. 208 p. (In Russ.).
21. GOST R ISO/MEK 7498-1-99. [Information technology. Open systems interconnection. Basic reference model. Part 1. The basic model]. M.: Standartinform. 2006. 58 p. (In Russ.).
22. Shreyder Yu.A. *Ravenstvo, skhodstvo, porjadok* [Equality, similarity, order]. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatel'stva "NAUKA". 1971. 254 p. (In Russ.).
23. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem*. [Reliability and safety of structurally complicated systems]. SPb.: Politehnika. 2000. 248 p. (In Russ.).
24. Tregubov R.B. [Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik ITMO – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016. vol. 5. pp. 879–892. (In Russ.).
25. Tregubov R.B., Oreshin A.N., Aleksikov Yu.G. [The algorithm for finding k shortest paths]. *Telekommunikatsii – Telecommunications*. 2013. vol. 6. pp. 10–15. (In Russ.).
26. Martello S., Toth P. *Knapsack problems: algorithms and computer implementations*. John Wiley & Sons Ltd. 1990. 296 p.
27. Tregubov R.B., Saitov I.A., Korolev A.V. *Methods of Optimization of Characteristics in Small and Medium Connectivity Data Transmission Networks*. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. vol. 68. pp. 167–179.
28. Tregubov R.B., Myasin N.I., Myasin K.I. [The optimization of a bit transmission rates in channels of a packet switched transport communication network providing a maximum of probability of timely delivery of protocol data UNITS]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport – T-Comm: Telecommunications and transport*. 2015. vol. 2. pp. 34–40. (In Russ.).
29. Kokoreva E.V. [Methods of the analysis of queueing network for assessment of figures of merit in communication networks]. *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii (ITRT-2016): sb. statey VI mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Information Technology. Electronics. Telecommunications (ITRT-2016): Proc. of VI International extramural scientific and technical conference. P.1]. Povolzhskiy gos. un-t servisa. Tol'yatti: PVGUS. 2016. pp. 302–307. (In Russ.).