

О.О. БАСОВ, И.А. САИТОВ, А.И. МОТИЕНКО, С.С. АСТАПОВ
**СИНТЕЗ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ТЕРМИНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
АУДИОМОНИТОРИНГА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВ**

Басов О.О., Саитов И.А., Мотиенко А.И., Астапов С.С. Синтез топологической структуры распределенной терминальной системы для аудиомониторинга пользователей локальных информационных пространств.

Аннотация. Широкое использование многомодальных интерфейсов, обусловленное многомодальностью традиционного межличностного общения, переход к полимодальному представлению информации и систем ее обработки позволили по-новому взглянуть на ряд инфокоммуникационных технологий и сервисов и предложить подход к их реализации на основе распределенных терминальных систем. Предложен подход к синтезу топологической структуры таких систем, реализуемый в два этапа: на первом определяется минимальная совокупность узлов коммуникации и их размещение на основе требований к доступности узлов коммуникации для различных категорий пользователей и глобальности распределенной терминальной системы, на втором — варианты построения узлов коммуникации и связей между ними, которые обеспечивают выполнение функций коммуникации пользователей локальных информационных пространств при обеспечении непрерывности связи для различных категорий пользователей. Представлен модельный пример задачи синтеза распределенной терминальной системы для аудиомониторинга двух категорий пользователей (взрослые и дети) в локальном информационном пространстве (доме), голосового управления подсистемами «умного» дома. Для ее решения на каждом этапе синтеза определены исходные данные, осуществлена формальная постановка задачи синтеза, представлен алгоритм решения и получаемые результаты. Так задача первого этапа синтеза представляет собой линейную целочисленную задачу математического программирования, решенную в модельном примере симплекс-методом. Решение задачи второго этапа основано на альтернативно-графовой формализации и методе «ветвей и границ». Полученные результаты демонстрируют возможности предложенного научно-методического инструментария синтеза топологической структуры распределенных терминальных систем и перспективность его использования во вновь возникающих задачах технической реализации новых инфокоммуникационных технологий и сервисов.

Ключевые слова: инфокоммуникационная система, распределенная терминальная система, топологическая структура, доступность узлов, непрерывность связи.

Введение. Использование в пределах локальных пространств (помещений, офисов, квартир, домов, зданий) многомодальных устройств ввода/вывода [1] и систем на их основе, объединяющих различные комбинации входных и выходных модальностей и названных в [2] распределенными терминальными системами (РТС), обеспечивает их пользователей рядом инфокоммуникационных технологий (таблица 1), придавая таким пространствам свойство интеллектуальности. При этом исходя из

личных предпочтений и потребностей в коммуникативных каналах пользователям РТС предоставляются различные функции коммуникации на основе необходимой комбинации доступных модальностей. Так, например, для реализации распределенной телефонии (телефонной связи) в локальном пространстве возможно использовать микрофонные и акустические системы, а для голосового управления системами «умного» дома или интеллектуального зала [3] или аудиомониторинга пользователей [4] такие локальные информационные пространства должны содержать распределенную сеть микрофонов [5].

Таблица 1. Инфокоммуникационные технологии локальных пространств

№ п/п	Акустический канал коммуникации		Визуальный канал коммуникации		Инфокоммуникационная технология
	входные модальности	выходные модальности	входные модальности	выходные модальности	
1	+				Многоканальная аудиозапись, голосовое управление, аудиомониторинг пользователей
2			+		Видеонаблюдение, управление жестами, видеомониторинг пользователей
3	+		+		Многоканальная аудиовидеозапись, многомодальное управление, бимодальный мониторинг пользователей
4		+			«Звук вокруг», сонификация
5				+	Масштабная визуализация, дополненная реальность
6	+	+			Распределенная телефония
7			+	+	Виртуальная реальность, усиленная сонификация
8	+	+	+	+	Распределенная видеосвязь

2. Обзор существующих систем мониторинга пользователей локальных информационных пространств.

Существующие системы мониторинга пользователей предназначены, как правило, для анализа физического (физиологического) состояния

различных групп населения, в первую очередь — пожилых людей [6-12]. Так, в [6] предлагается система определения факта падения человека на основе многомодальных беспроводных сенсорных сетей, включающих датчики температуры, движения и биосенсоры, видеокамеры, аудиодатчики и RFID-метки. Для повышения точности обнаружения падений и минимизации ложных срабатываний сенсоры используются совместно. RFID-метки применяются для отслеживания местоположения людей и активации видеокамер в помещениях, где последние находятся. Видеокамеры обеспечивают наблюдение и распознавание действий людей. Биосенсоры, например, измеряют артериальное давление или частоту сердечных сокращений, контролируя состояние здоровья. Датчики окружающей среды используются для предоставления контекстной информации об окружающей среде. Система позволяет осуществлять удаленный мониторинг ее пользователей посредством мобильных и локальных вычислительных сетей.

В системах предотвращения падений основное внимание уделяется их обнаружению. Как таковые падения неизбежны, и их определение для предотвращения травм имеет большое значение, однако другие области предотвращения риска падения представляют серьезную проблему. Предполагается, что будущие системы предотвращения падений будут более эффективны для устранения внешних рисков, в частности от того, насколько успешно врачи, проводящие домашние обследования, могут использовать оборудование, а пожилые люди — самостоятельно оценить свои потребности во вспомогательном оборудовании при отсутствии персонала в доме [7]. С этой целью изучение расположения мебели и точности ее измерения могло бы обеспечить правильное размещение оборудования в доме, что привело бы к более эффективному его использованию.

В [8] исследуется преимущества использования мобильной трехмерной (3D) технологии визуализации для расширения мероприятий по оценке состояния окружающей среды, направленных на преодоление внешних факторов риска падения в домашних условиях.

Беспроводная домашняя система мониторинга [9] включает в себя монитор состояния человека, носимый на запястье, и опционально пульсоксиметры или мониторы артериального давления, подключаемые по беспроводной сети, и позволяет собирать данные о деятельности и местоположении человека, распознавать падения, выдавать оповещения о панике.

В [10] предлагается система удаленного мониторинга здоровья пожилых людей на основе «умного дома», состоящая из «умной одежды», считывающей параметры сердцебиения и движения человека, шлюза «умного дома», предназначенного для мультиплексирования и передачи данных на сервер здравоохранения. Предлагаемая система обладает хорошей масштабируемостью и простотой эксплуатации.

В России аналогом рассмотренных систем является автоматизированная система дистанционного мониторинга здоровья человека «Монитор здоровья» [11], позволяющая автоматически считывать данные с различных специализированных приборов анализа параметров здоровья человека. При необходимости пользователь может предоставить врачу доступ к хранящимся в системе измерениям.

В подавляющем большинстве систем, за исключением [6], мало внимания уделено анализу всей совокупности акустических данных, что не позволяет полно оценивать текущую ситуацию в локальном информационном пространстве, оперативно реагировать на ее изменение и вырабатывать управляющие воздействия при возникновении нештатных (критических) ситуаций.

Недостатками системы мониторинга [6] являются необходимость размещения на пользователях RFID-меток, использование для их локализации встроенных видеокамер и, как следствие, сложность и дороговизна такой системы, а также отсутствие рекомендаций по размещению аудиодатчиков и возможности их использования для локализации пользователя в некотором пространстве. Для их преодоления должна быть решена задача синтеза топологической структуры РТС (сенсорной сети или более конкретно — распределенной сети микрофонов), позволяющая выбрать наилучший по заданным критериям оптимальности вариант размещения аудиодатчиков в локальном информационном пространстве для локализации пользователя в нем, считывания акустического сигнала с требуемым качеством, его предварительной обработки и передачей для последующего анализа физического (физиологического) состояния человека либо для распознавания команд управления системами «умного» дома.

Следует отметить, что последовательный синтез РТС должен основываться на разработке ее физической (топологической и функциональной) структуры, начиная с самого простого случая — одной входной (выходной) модальности одного из доступных каналов коммуникации с последовательным наращиванием числа модальностей и каналов.

3. Обзор существующих подходов к постановкам и решению задач анализа и синтеза (оптимизации характеристик) РТС и их элементов. В современной науке сложилось три принципиально различающихся подхода к формализации задач синтеза, отражающих взаимосвязь между исходными данными и представлениями о структуре и функционировании сложной системы:

– синтез структуры системы при заданных алгоритмах ее функционирования (1-й класс задач);

– синтез оптимального поведения и алгоритмов функционирования системы при известной структуре (2-й класс задач);

– синтез структуры и алгоритмов (поведения) функционирования системы, распределения их оптимального состава (3-й класс задач).

Исследования показывают, что при наблюдающемся прогрессе в решении 1 и 2 класса задач практически отсутствуют подходы к формализации и решению 3 класса задач, к которым в методологическом плане примыкают задачи синтеза РТС. Их решение может быть найдено при комплексировании структурно-функционального и функционально-структурного подходов.

В структурно-функциональном подходе системотехнические задачи представляют собой взаимоувязанный комплекс задач анализа и оптимизации характеристик РТС или ее подсистем через параметры ее физической структуры. Такие задачи далее будем называть задачами по оптимизации структуры (ЗОС). Классическая ЗОС включает в свой состав частные задачи по синтезу (оптимизации) топологической и функциональной структур, в совокупности обеспечивающих минимум критерия экономической природы при выполнении ограничений на вероятностно-временные характеристики. При использовании графоматричных моделей вычислительная сложность ЗОС является полиномиальной. Для решения таких задач на сегодняшний день в практике проектирования ИКС установились декомпозиционный и глобальный подходы.

В первом случае РТС разбивается, например, на центральный узел коммутации (ЦУК), узлы коммутации (УК) и вспомогательные УК (ВУК), структуры которых оптимизируются отдельно (рисунок 1). Очевидно, что декомпозиционному подходу свойственен такой недостаток, как неконтролируемая ошибка декомпозиции, поскольку часто открытым остается вопрос выбора подсистем и распределения общесистемных норм между ними.

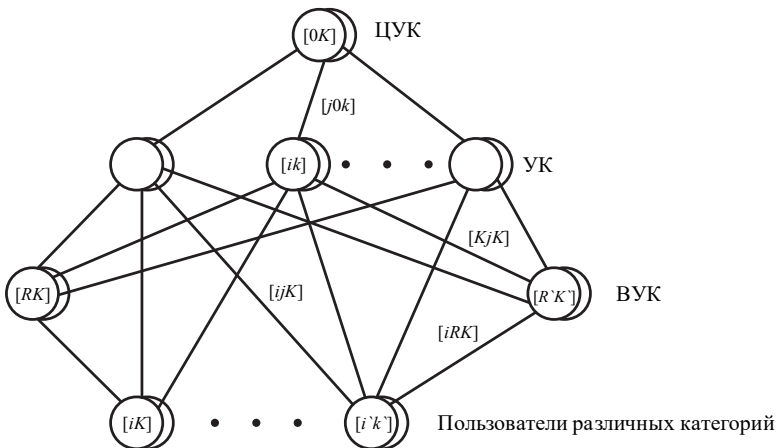


Рис. 1. Обобщенная схема распределенной терминальной системы для аудиомониторинга пользователей локальных информационных пространств

Второй подход подразумевает работу со структурой РТС в целом и на первый план выступает проблема снижения вычислительной сложности ЗОС. Снижение вычислительной сложности ЗОС может быть получено за счет огрубления топологической, функциональной и/или конструктивной структуры РТС.

В ряде случаев для решения ЗОС высокой вычислительной сложности применяется многоэтапная процедура [7]. Такой подход базируется на применении серии различающихся степенью адекватности (и соответственно размерностью) моделей, для которых выходные результаты очередного этапа оптимизации являются начальными условиями поиска для последующего этапа. Исследования показали, что наблюдаемые в реальных условиях среднестатистическая точность исходных данных и погрешности, вносимые модельными допущениями, позволяют с достаточной для практики точностью ограничиться двумя этапами решения типовых ЗОС.

Независимо от применения декомпозиционного или глобального подхода выбор алгоритма решения конкретной ЗОС определяется особенностями ее постановки, например спецификой предпроектной ситуации. Таким образом, ЗОС может быть сведена к той или иной задаче математического программирования или их последовательности.

При синтезе структур систем, аналогичных РТС, например инфокоммуникационных систем, уже многие годы широко используются методы «ветвей и границ» и «устранения ребер», адаптированных под цели оптимизации структуры. Однако из-за высокой вычислительной сложности вне зависимости от применяемого поискового алгоритма возможности этих методов решения ЗОС на практике ограничиваются числом узлов соответствующего графа.

Недостатками применения эвристических (в том числе переборных) алгоритмов являются трудность выбора стартовой топологии, во многом определяющей эффективность оптимизации, и необходимость периодической проверки ограничений по связности структуры. Им также свойственны существенные временные затраты на поиск допустимого начального плана распределения потоков.

Выявленные недостатки существующих подходов к решению ЗОС РТС стимулируют развитие теоретико-методологической базы проектирования. Перспективным в этом смысле является комплексный подход, базирующийся одновременно на структурно-функциональной и функционально-структурной методологиях. В данном случае задача синтеза топологической структуры РТС для аудиомониторинга пользователей локальных информационных пространств состоит в рациональном отображении множества взаимосвязанных функций коммуникации на множество взаимосвязанных узлов коммуникации, обслуживающих различные категории пользователей с учетом их числа, расположения и состава аппаратно-программными средств. После ее решения оптимизируется распределение выполняемых функций и задач коммуникации по узлам РТС — определяется ее функциональная структура.

Задачи синтеза топологической и функциональной структур РТС, по сути, представляют собой задачи оптимизации характеристик сложных систем, функционирование которых во многом определяется принятыми принципами и алгоритмами обработки многомодальной информации, степенью централизации управления, согласованностью целей узлов коммуникации различного уровня. Моделям оптимизации функционирования РТС посвящены работы [1, 2], здесь же предложен научно-методический аппарат двухэтапной процедуры синтеза топологической структуры РТС, рассмотрен модельный пример его применения.

4. Постановка и решение задачи определения минимальной совокупности узлов коммуникации и их размещения. На первом этапе синтеза топологической структуры РТС решается задача определения минимальной совокупности узлов коммуникации (УК) и их размещения, исходя из требований к доступности УК для различных

категорий пользователей и глобальности РТС. Под различными категориями пользователей понимаются их группы, отличительной особенностью которых является использование для взаимодействия с РТС одинаковых каналов коммуникации (модальностей). *Доступность узлов* определяется временем τ_{ij} максимальной продолжительности взаимодействия пользователя i -й категории с j -м УК ($j = \overline{1, J}$), а *глобальность*

$$H_i = \frac{\tau_i}{\tau},$$

где $\tau_i (i = \overline{1, I})$ — общее время доступности РТС i -й категории пользователей; τ — общее время нахождения пользователя в заданном локальном информационном пространстве.

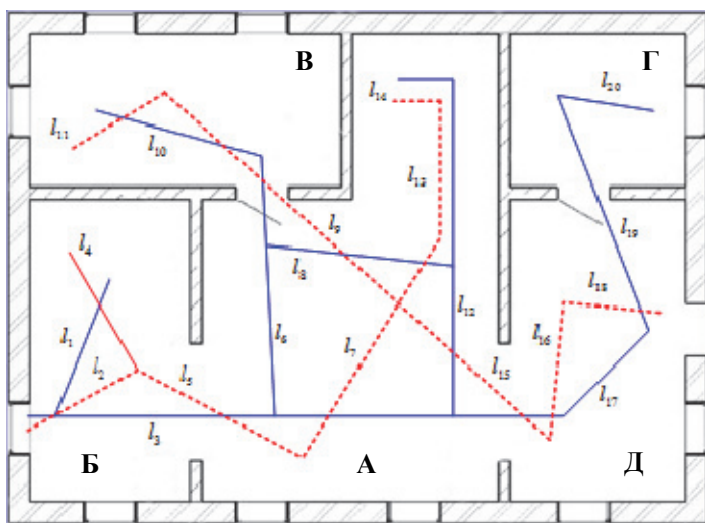
Рассмотрим модельный пример решения задачи синтеза топологической структуры РТС для аудиомониторинга пользователей в заданном локальном пространстве (рисунок 2). В соответствии с определенными в [2] обозначениями такая система включает в себя:

- ЦУК, предназначенный для обработки и передачи аудиоинформации от УК в систему мониторинга;
- непосредственно УК, представляющие в рассматриваемом случае комплексы аппаратно-программных средств сбора, обработки и передачи ЦУК аудиоинформации в цифровом виде;
- ВУК, представляющие собой отдельные микрофоны.

В модельном примере микрофоны УК и ВУК размещаются на потолке помещений и имеют направленную вниз диаграмму направленности, а пользователи делятся на две категории по возрастному признаку: первой категории ($i = 1$) — взрослые, для которых $k_1 = 2$, — доступны все помещения локального информационного пространства; второй категории ($i = 2$) — дети, для которых $k_2 = 1$, — доступны все помещения, за исключением Г, усредненные маршруты их передвижения отличны в связи с отсутствием необходимости пользования некоторыми предметами интерьера (рисунок 2 б).



а)



б)

Рис. 2. 3D-проекция (а) и план локального информационного пространства (б) с указанием маршрутов движения пользователей двух категорий (маршрут передвижения пользователей первой категории обозначен сплошной линией, пользователей второй категории – прерывистой линией)

Пользователи каждой из категорий предъявляют идентичные требования к номенклатуре и качеству предоставляемых функций коммуникации (услугам) и имеют близкие параметры движения (скорость, направление и т.п.).

Исходными данными для решения задачи определения состава узлов коммуникации и их размещения (рисунок 3) являются (таблицы 2-4):

- $l = \overline{1, L}$ — участки, на которых пользователям доступны УК [2];
- n_l — множество узлов, которые доступны пользователям соответствующей категории на l -м участке;
- k_i — число узлов, необходимых для обслуживания пользователей i -й категории;
- L_i — множество индексов участков, на которых пользователям i -й категории ($i = \overline{1, I}$) доступна РТС;
- θ_l — время доступности УК для пользователя на l -м участке;
- c_j — затраты на создание j -го УК ($j = \overline{1, J}$).

Начальная (до оптимизации) схема возможного размещения узлов коммуникации в локальном информационном пространстве предполагает размещение центрального узла коммуникации в техническом помещении Γ , по одному узлу коммуникации — в каждом из помещений, вспомогательные узлы коммуникации — по помещениям с целью увеличения доступности узлов коммуникации.

Задача определения состава и размещения УК в общем случае состоит в минимизации затрат на создание УК:

$$\min \sum_{j=1}^J c_j x_j, \quad (1)$$

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если в системе используется узел } j \ (j = \overline{1, J}); \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

при ограничениях на глобальность системы связи, предоставляемой пользователям различных категорий:

$$\sum_{l \in L_i} \theta_l y_l \geq H_i \tau_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где

$$y_l = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-й участок доступности используется в РТС;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

при ограничениях, например:

$$\sum_{j \in m_i} x_j \geq k_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (3)$$

при этом взаимосвязь между переменными x_j и y_l задается условиями:

$$\sum_{j \in n_l} x_j \geq y_l \geq \frac{1}{|n_l|} \sum_{j \in n_l} x_j, \quad l = \overline{1, I}, \quad (4)$$

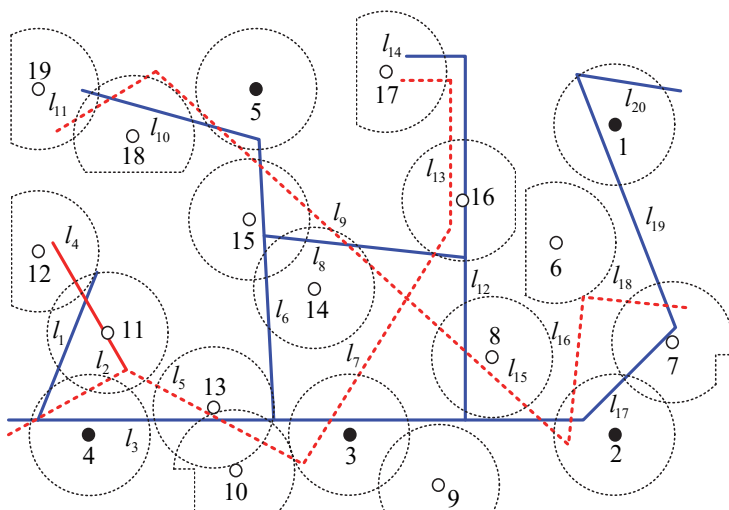


Рис. 3. Исходные данные для решения задачи определения минимальной совокупности узлов коммуникации и их размещения

Таблица 2. Время доступности УК (ВУК) для пользователей первой категории

L_1	1	3	6	9	10	12	14	17	19	20
n_l	4, 11, 12	2, 3, 4, 10, 13	5, 13, 14, 15	14, 15, 16	5, 18, 19	8, 16	17	2, 7	1, 7	1
θ_l, c	7	10	3	2	3	6	1	4	2	1

Таблица 3. Время доступности УК (ВУК) для пользователей второй категории

L_2	2	4	5	7	9	11	13	14	15	16	18
n_l	4, 11	11, 12	3, 10, 11, 13	3, 16	5, 14, 15	18, 19	16	17	2, 8	2	7
θ_l, c	4	4	5	1	6	2	1	1	2	1	1

Таблица 4. Временные и стоимостные параметры узлов коммуникации

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ_{1j}, c	3	1	2	2	0,5	0	2	3	0	1
τ_{2j}, c	0	1	1	1	0,5	0	1	2	0	2
$c_j,$ y.e	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2
j	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
τ_{1j}, c	2	1	2	4	3	2	0,5	2	0,5	
τ_{2j}, c	2	0	2	1	1	2	0,5	2	1	
$c_j,$ y.e.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

Задача (1)–(4) представляет собой линейную целочисленную задачу математического программирования, результаты решения которой симплекс-методом позволили определить в рассматриваемом модельном примере, какие узлы необходимы в системе аудиомониторинга пользователей локальных информационных пространств, их размещение, а также состав узлов, обслуживающих пользователей двух категорий (рисунок 4) [13-15].

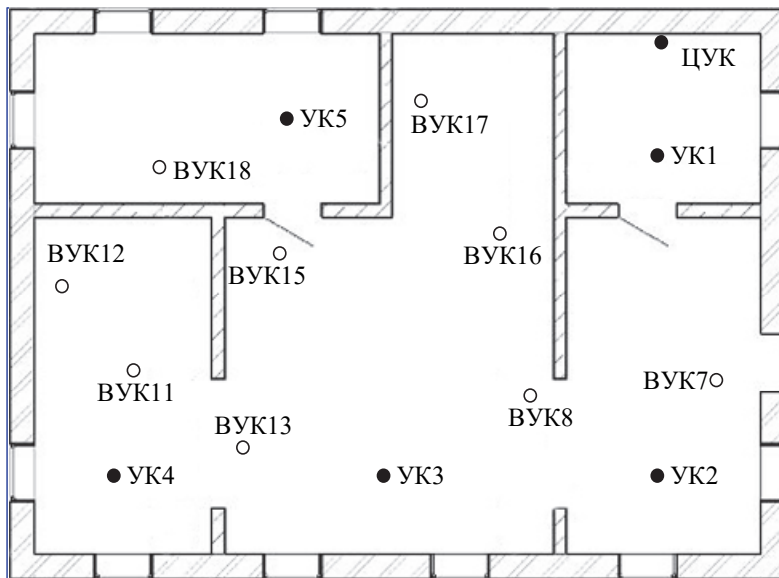


Рис. 4. Результаты решения задачи определения минимальной совокупности узлов коммуникации и их размещения

Для полученного решения глобальность РТС для различных категорий пользователей составила:

$$H_1 = \sum_j \tau_{1j} / \tau = 0,95;$$

$$H_2 = \sum_j \tau_{2j} / \tau = 0,93,$$

где τ_{1j} , τ_{2j} — общее время доступности j -го узла РТС пользователям первой и второй категории соответственно.

Следовательно, пользователям первой категории РТС будет доступна в 95 % от общего времени нахождения в заданном локальном информационном пространстве (рисунок 2), пользователям второй категории — в 93 % от общего времени нахождения.

5. Постановка и решение задачи определения вариантов построения узлов коммуникации и связей между ними. На втором этапе синтеза топологической структуры РТС для выбранной

совокупности узлов РТС и их взаимосвязей (рисунок 5) определяются варианты построения УК (ВУК) и связей между ними, которые обеспечивают выполнение функций аудиомониторинга пользователей локального информационного пространства при обеспечении непрерывности связи для заданных категорий пользователей.

С учетом возможных внешних неблагоприятных воздействий, определяющих вероятности надежной работы (выполнения функций коммуникации) РТС и ее элементов, исходными данными для решения задачи определения вариантов построения УК и связей между ними являются:

- $l = \overline{1, L}$ — варианты построения узла (связи между узлами). Для полученных результатов решения задачи первого этапа синтеза (рисунок 4) выбраны два варианта реализации программно-аппаратных комплексов для УК и три варианта микрофонов для ВУК;
- P_{jl} — вероятности надежной работы l -го варианта построения j -го УК за рассматриваемый интервал времени;
- P_{ijl} — вероятности надежной работы акустических каналов между пользователем и УК;
- P_{j0l} — вероятности надежной работы каналов связи между УК и ЦУК за рассматриваемый интервал времени для различных вариантов их реализации;
- P_{Rl} — вероятности надежной работы l -го варианта R -го ВУК за рассматриваемый интервал времени ($l = \overline{1, L_r}, r = \overline{1, R}$);
- P_{iRl} — вероятности надежной работы акустических каналов между пользователем и ВУК;
- P_{Rjl} — вероятности надежной работы каналов связи между ВУК и УК за рассматриваемый интервал времени для различных вариантов их реализации;
- $P_i^{\text{доп}}$ — допустимая вероятность надежной работы РТС для пользователей i -й категории;
- $c_{jl}, c_{Rl}, c_{ijl}, c_{iRl}, c_{Rjl}, c_{j0l}$ — затраты на организацию основных и вспомогательных УК, каналов связи и акустических каналов для различных вариантов их реализации;

В рассматриваемом примере индекс $j = 0$ соответствует ЦУК, индексы $j = \overline{1, J}$ — совокупности УК ($l = \overline{1, L_j}, j = \overline{1, J}$), а под неблагоприятными внешними воздействиями, влияющими на

надежность работы различных вариантов построения УК и ВУК, понимаются сложные акустические условия, возникающие в следствие появления нескольких пользователей в определенных местах локального информационного пространства, открывания окон и дверей (или их отсутствия). Каналы связи между ВУК и УК, УК и ЦУК за рассматриваемый интервал времени считаются абсолютно надежными, в связи с чем, вероятности $P_{Rjl} = 1$, $P_{j0l} = 1$.

Допустимые вероятности успешной работы РТС для выделенных категорий пользователей $P_1^{доп} = 0,9$, $P_2^{доп} = 0,8$. Затраты на организацию вариантов построения каналов коммуникации (связи) между основными и вспомогательными узлами коммуникации, центральным узлом коммуникации приняты равными $c_{ijl} = c_{irli} = c_{Rjl} = c_{j0l} = 0,25$ у.е. ввиду относительно простоты и дешевизны реализации проводной связи между указанными узлами коммуникации в локальном информационном пространстве. Остальные параметры для определения вариантов построения УК и связей между ними в рассматриваемом модельном примере определены случайным образом (таблицы 5, 6).

Таблица 5. Характеристики надежности и стоимости УК и каналов коммуникации

		<i>j</i>	1	2	3	4	5
P_{jl}	$l=1$		0,90	0,90	0,80	0,90	0,90
	$l=2$		0,91	0,91	0,90	0,91	0,91
P_{ijl}	$l=1$	$i=1$	0,80	0,81	0,80	0,78	0,80
		$i=2$	0,70	0,65	0,70	0,75	0,70
	$l=2$	$i=1$	0,85	0,85	0,85	0,80	0,85
		$i=2$	0,75	0,70	0,70	0,80	0,75
c_{jl} , у.е.	$l=1$		7	7	7	7	7
	$l=2$		6	6	6	6	6

Задача определения вариантов построения УК и связей между ними в общем случае сводится к минимизации затрат

$$\min \left(\sum_k c_{jk} x_{jk} + \sum_k c_{iRk} x_{iRk} + \sum_k c_{ijk} x_{ijk} + \sum_k c_{jRk} x_{jRk} + \sum_k c_{j0k} x_{j0k} \right), \quad (5)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned}
 & P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk}) \left(1 - P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) \right) + \\
 & + \left(1 - P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk}) \right) \left(1 - P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) \right) \geq P_i^{\text{ДОП}}, \\
 & \sum_k x_{ik} = 1, \quad \sum_k x_{iRk} = 1, \quad \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \sum_k x_{jRk} = 1, \quad \sum_k x_{j0k} = 1,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } k\text{-й вариант построения } j\text{-го узла;} \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } k\text{-й вариант связи между элементами } i \text{ и } j; \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

$$x_{j0k} = \begin{cases} 1, & \text{если выбирается } k\text{-й вариант связи между элементами } j \text{ и } 0; \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk}) &= \left(\sum_k P_{Rk} x_{Rk} \right) \left(\sum_k P_{iRk} x_{iRk} \right); \\
 P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) &= \prod_j \left[1 - \left(1 - \sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left(1 - \sum_k P_{Rjk} x_{Rjk} \right) \left(\sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right]; \\
 P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) &= \prod_j \left[1 - \left(\sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left(\sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right].
 \end{aligned}$$

Для решения задачи (5), (6) в модельном примере использован вариант переборного решения, тогда как для большего числа категорий пользователей узлов коммуникации и альтернатив может быть использована альтернативно-графовая формализация и предложенный в [16, 17] алгоритм, основанный на схеме «ветвей и границ». Для задания возможных вариантов построения узлов РТС и взаимосвязей между ними введен граф G_j , а для определения одного из возможных вариантов реализации узлов РТС с их взаимосвязями \odot подграф $G_j^* \in G_j$ [18, 19].

Таблица 6. Характеристики надежности и стоимости ВУК и каналов коммуникации

j		6	7	8	9	10	11	12	
P_{RI}	$l=1$	0,90	0,80	0,90	0,90	0,90	0,80	0,90	
	$l=2$	0,91	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,91	
	$l=3$	0,81	0,80	0,78	0,80	0,81	0,80	0,78	
P_{iRI}	$l=1$	0,65	0,70	0,75	0,70	0,65	0,70	0,75	0,70
		0,85	0,85	0,80	0,85	0,85	0,85	0,80	0,85
	$l=2$	0,70	0,70	0,80	0,75	0,70	0,70	0,80	0,70
		0,90	0,80	0,90	0,90	0,90	0,80	0,90	0,90
	$l=3$	0,91	0,90	0,91	0,91	0,91	0,90	0,91	0,88
		0,81	0,80	0,78	0,80	0,81	0,80	0,78	0,75
$C_{RI},$ у.е.	$l=1$	5	3	4	3	2	3	3	
	$l=2$	3	4	4	5	4	4	5	
	$l=3$	3	3	2	3	4	5	3	
j		13	14	15	16	17	18	19	
P_{RI}	$l=1$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	
	$l=2$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	
	$l=3$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
P_{iRI}	$l=1$	$i=1$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
		$i=2$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
	$l=2$	$i=1$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
		$i=2$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
	$l=3$	$i=1$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
		$i=2$	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
$C_{RI},$ у.е.	$l=1$	5	3	4	3	2	3	3	
	$l=2$	3	4	4	5	4	4	5	
	$l=3$	3	3	2	3	4	5	3	

На первом этапе работы алгоритма решения задачи (5) исключаются варианты на последовательных участках графа G_j с учетом правил доминирования и формируются агрегированные варианты. Затем исключаются варианты, заведомо не входящие в оптимальное решение, для этого на отдельных участках вычисляются максимально возможные вероятности их исправной работы. В (6) во всех сомножителях участков, кроме одного, вариативные части заменяются на вычисленные максимально возможные вероятности исправной работы участков. В незафиксированном участке последовательно анализируются и исключаются варианты, использование которых не удовлетворяет (6).

Далее осуществляется ветвление по сформированным вариантам построения отдельных участков системы. При этом число уровней ветвления равно суммарному числу отдельных участков системы. Оценки (5) в процессе ветвления находятся следующим образом: для зафиксированных вариантов выбираются соответствующие величины, а для незафиксированных переменных — минимально возможные затраты на соответствующих участках. Оценки для (6) вычисляются аналогично, однако используются максимально возможные вероятности исправной работы для незафиксированных участков. Граф возможных реализаций РТС для рассматриваемого модельного примера имеет вид, показанный на рисунке 5, где жирными линиями выделены пути, соответствующие оптимальному решению задачи (5) при ограничениях (6).

6. Заключение. Несмотря на видимую простоту модельного примера в виду использования лишь одной входной модальности, полученный результат наглядно демонстрирует возможности разработанного научно-методического инструментария синтеза топологической структуры РТС. При исследовании систем с большим числом входных и выходных модальностей и более сложными взаимосвязями между ее элементами не всегда представляется возможным выразить аналитически параметры системы через параметры элементов, поэтому в данном случае для получения оценок надежности могут использоваться методы «критических путей и сечений» [20].

После синтеза топологической структуры РТС на основе определенного множества УК и ВУК, обслуживающих пользователей различных категорий, и заданных функций коммуникаций для каждой из них решается задача оптимального (квазиоптимального) распределение задач (функций) по узлам системы [2]. Критериями оптимизации в данном случае выступают затраты на оснащение УК (ВУК, ЦУК) программно-аппаратными средствами и их эксплуатацию, оперативность, надежность, массогабаритные показатели и энергопотребление.

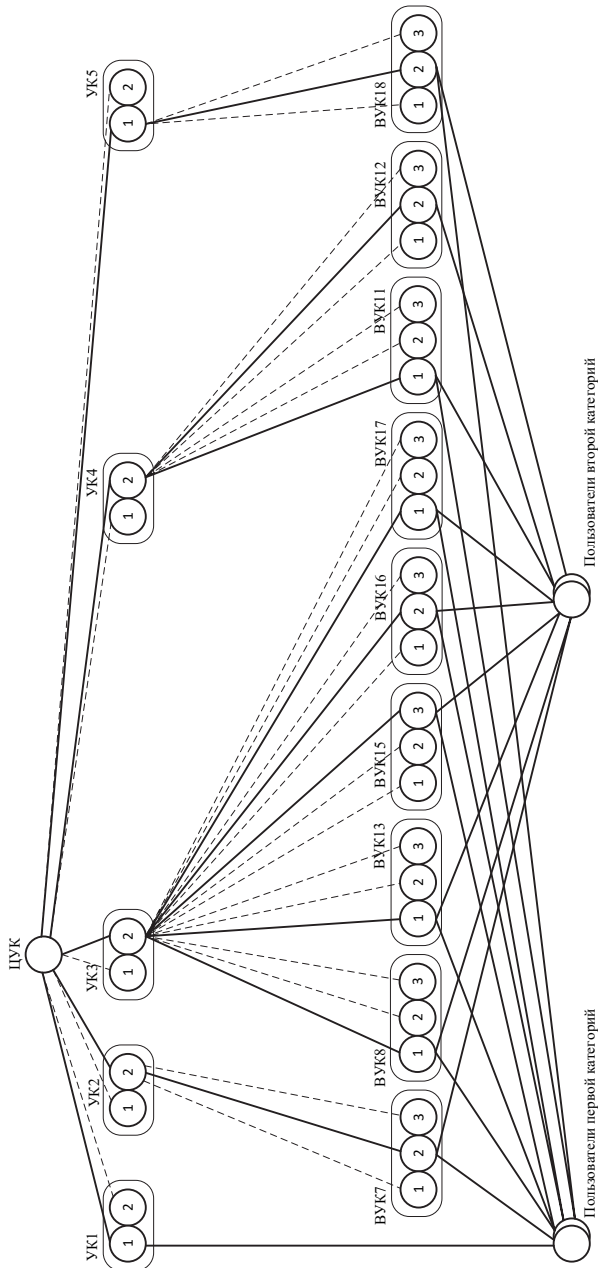


Рис. 5. Граф возможных реализаций РТС

Указанная задача синтеза функциональной структуры, равно как и рассмотренная в работе задача синтеза топологической структуры, является статической, поскольку номенклатура и распределение функций коммуникаций, а также состав реализующих их узлов и их расположение определяются для некоторого перспективного периода времени. Для РТС, функционирующей в течение достаточно длительного времени, приобретает актуальность совместная постановка задачи синтеза структуры и выбора плана (траектории) развития структуры системы.

Такая задача, являющаяся, по сути, динамической, в отличие от статической направлена на оптимизацию не только состава узлов, взаимосвязи между ними и распределение функций по УК (ВУК) для заданного интервала времени, но и на формирование (синтез) плана развития системы. Соответствующий научно-методический инструментарий подлежит разработке в процессе последующих исследований.

Литература

1. *Басов О.О., Карпов А.А., Саитов И.А.* Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления: монография // Орёл: Академия ФСО России. 2015. 272 с.
2. *Киселев Ю.В., Мотиенко А.И., Басов О.О., Саитов И.А.* Структурно-функциональная модель интеллектуальной инфокоммуникационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1034–1046.
3. *Кузнецов Д.А., Офицеров А.И., Кузнецов А.В., Чистяков С.В., Басов О.О.* Предпосылки создания интеллектуального зала совещаний // Научный результат. Информационные технологии. 2018. Т.3. № 2.
4. *Ронжин Ал.Л., Ронжин Ан.Л.* Система аудиовизуального мониторинга участников совещания в интеллектуальном зале // Доклады ТУСУРа. 2011. № 1(22). Ч. 1. С. 153–157.
5. *Смирнов А.В. и др.* Подходы к выбору устройств ввода/вывода распределенных терминальных систем // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика. Информатика. 2019. Т. 46. № 2. С. 337–348.
6. *Alemdar H.Ö. et al.* Multi-modal fall detection within the WeCare framework // Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. 2010. pp. 436–437.
7. *Hamm J., Money A.G., Atwal A., Paraskevopoulos I.* Fall prevention intervention technologies: A conceptual framework and survey of the state of the art // Journal of biomedical informatics. 2016. vol 59. pp. 319–345.
8. *Hamm J.J.* Technology-assisted healthcare: exploring the use of mobile 3D visualisation technology to augment home-based fall prevention assessments // Ph.D. Thesis. Brunel University London. 2018. 316 p.
9. *Papadopoulos A., Crump C., Wilson B.* Comprehensive home monitoring system for the elderly // Wireless Health 2010. 2010. pp. 214–215.
10. *Guan K., Shao M., Wu S.* A remote health monitoring system for the elderly based on smart home gateway // Journal of healthcare engineering. 2017. vol. 2017. 10 p.

11. Шалковский А.Г., Купцов С. М., Берсенева Е.А. Актуальные вопросы создания автоматизированной системы дистанционного мониторинга здоровья человека // Врачи и информационные технологии. 2016. №. 1. С. 67–69.
12. Giannoulis D., Benetos E., Stowell D., Plumbley M.D. IEEE AASP Challenge on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events – Training Dataset for Event Detection Task, subtasks 1 -OL and 2 – OS // Tech. Rep. 2012.
13. Ширяев В.И. Исследование операций и численные методы оптимизации // Ленанд. 2017. 224 с.
14. Вентцель Е.С. Исследование операций // М.: Советское радио. 1972. 552 с.
15. Ficken F.A. The simplex method of linear programming // Courier Dover Publications. 2015. 64 p.
16. Цвиржун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем // М.: Наука. 1982. 200 с.
17. Баранов В.В., Цвиржун А.Д. Управление развитием: структурный анализ, задачи, устойчивость // Автоматика и телемеханика. 2018. №. 10. С. 55–75.
18. Corrado A.J. Dynamics of complex systems // CRC Press. 2019.
19. Brinsmead T.S., Hooker C. Complex Systems Dynamics and Sustainability: Conception, Method and Policy // Philosophy of Complex Systems. 2011. vol. 10. pp. 809–838.
20. Гадошин В.А., Ушаков И.А. Надежность сложных информационно-управляющих систем // М.: Советское радио. 1975. 191 с.

Басов Олег Олегович — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, факультет информационных технологий и программирования, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. (Университет ИТМО). Область научных интересов: инфокоммуникационная система, распределенная терминальная система, топологическая структура, доступность узлов, непрерываемость связи, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 170. oobasov@mail.ru; Кронверкский пр., 49, 197101, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7-919-201-18-97.

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. Akratovich@mail.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302034, Орел, Российская Федерация; р.т.: +7(4862)549801.

Мотиенко Анна Игоревна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, отдел аспирантуры, информационно-образовательных технологий и услуг, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: инфокоммуникационная система, распределенная терминальная система, моделирование инфокоммуникационных систем медицинского назначения, сбор и анализ статистических медицинских данных, мониторинг здоровья населения. Число научных публикаций — 30. anna.gunchenko@gmail.com; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7-812-328-03-82.

Астапов Сергей Сергеевич — Ph.D., доцент, кафедра программного обеспечения факультета информационных технологий, Таллинский Технический Университет. Область научных интересов: инфокоммуникационная система, распределенная терминальная система, топологическая структура, доступность узлов, непрерываемость связи. Число научных публикаций — 24. sergei.astapov@ttu.ee; Строительная дорога, 5, 19086, Таллин, Эстония; р.т.: +372 56 667 203.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проекты № 18-07-00380, № 19-07-00832).

O.O. BASOV, I.A. SAITOV, A.I. MOTIENKO, S.S. ASTAPOV
**SYNTHESIS OF THE TOPOLOGICAL STRUCTURE OF
DISTRIBUTED TERMINAL SYSTEM FOR AUDIO MONITORING
OF USERS OF LOCAL INFORMATION SPACES**

Basov O.O., Saitov I.A., Motienko A.I., Astapov S.S., Synthesis of the Topological Structure of Distributed Terminal System for Audio Monitoring of Users of Local Information Spaces.

Abstract. A widespread use of multi-user interfaces, due to multimodality of traditional interpersonal communication, a transition to a polymerized presentation of information and systems, has allowed the creation of new approaches to their implementation based on distributed terminal systems. An approach to the synthesis of topological structures of such systems implemented in two stages is proposed in the article. The first stage determines a minimum set of communication nodes and their location based on the requirements for the availability of communication nodes for various categories of users and the globality of a distributed terminal system. The second stage determines options for constructing communication nodes and connections between them, which ensure the performance of audio monitoring functions of users of local information spaces while ensuring continuity of a bridge for different categories of users. A model example of the synthesis of a distributed terminal system for audio monitoring of two categories of users (adults and children) in the local information space (home), voice control subsystems of the "smart home" is presented. As a part of its solution, at each stage of the synthesis, the initial data are determined, a formal formulation of the synthesis problem is carried out, an algorithm for the solution and the results are presented. So the task of the first stage of the synthesis is a linear integer mathematical programming problem, solved in the model example by the simplex method, the solution of the second stage problem is based on the alternative graph formalization and the method of "branches and borders". The obtained results clearly demonstrate the capabilities of the proposed scientific and methodological tools for the synthesis of the topological structure of distributed terminal systems and the prospects of its use in the newly arising tasks of the technical implementation of new infocommunication technologies and services.

Keywords: Infocommunication System, Distributed Terminal System, Topological Structure, Node Availability, Communication Continuity.

Basov Oleg Olegovich — Senior Researcher, Information Technologies and Programming Faculty, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: infocommunication system, distributed terminal system, topological structure, node availability, communication continuity, design of multimodal infocommunication systems. The number of publications — 170. oobasov@mail.ru; 49, Kronverksky pr., 197101, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +7-919-201-18-97.

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; 35, Priborostroitel'naya str., 302034, Orel, Russian Federation; office phone: +7(4862)549801.

Motienko Anna Igorevna — Ph.D., Senior Researcher, Department of Post-Graduate Studies, Information and Educational Technologies and Services, St. Petersburg Institute for Informatics

and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: infocommunication system, distributed terminal system, Keywords modeling of information communication systems for medical purposes, collection and analysis of statistical medical data, public health monitoring. The number of publications — 30. anna.gunchenko@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +7-812-328-03-82.

Astapov Sergei Sergeevich — Ph.D., Associate Professor, Department of Software Science of School of Information Technologies, Tallinn University of Technology. Research interests: infocommunication system, distributed terminal system, topological structure, node availability, communication continuity. The number of publications — 24. sergei.astapov@ttu.ee; 5, Ehitajate tee, 19086, Tallinn, Estonia; office phone: +372 56 667 203.

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 18-07-00380, 19-07-00832).

References

1. Basov O.O., Karpov A.A., Saitov I.A. *Metodologicheskie osnovy sinteza polimodal'nyh infokommunikacionnyh sistem gosudarstvennogo upravleniya: monografiya*. [Methodological Bases of Synthesis of Multimodal Communication Systems of Public Administration]. Orel: Akademiya FSO Rossii Publ. 2015. 277 p. (In Russ.).
2. Kiselev Yu.V., Motienko A.I., Basov O.O., Saitov I.A. [Structural-functional model of intelligent infocommunication system]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki – Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018. Issue 18. vol. 6. pp. 1034–1046. (In Russ.).
3. Kuznetsov D.A. et al. [The Prerequisites of Creation of the Intellectual Hall of Meetings]. *Informacionnye tekhnologii – Information Technologies*. 2018. Issue 3. no. 2. (In Russ.).
4. Ronzhin A.L., Ronzhin An.L. [The system of audiovisual monitoring of participants in the intelligent meeting room]. *Doklady TUSUR – Proceedings of TUSUR*. 2011. vol. 1(22). Chapter 1. pp. 153–157. (In Russ.).
5. Smirnov A.V. et al. [Approaches to Selection of Input and Output Devices of Distributed Terminal Systems]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Informatika – Belgorod State University Scientific Bulletin. Series "Economics. Computer Science"*. 2019. Issue 46. vol. 2. pp. 337–348.
6. Alemdar H.Ö. et al. Multi-modal fall detection within the WeCare framework. Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. 2010. pp. 436–437.
7. Hamm J., Money A.G., Atwal A., Paraskevopoulos I. Fall prevention intervention technologies: A conceptual framework and survey of the state of the art. *Journal of biomedical informatics*. 2016. vol. 59. pp. 319–345.
8. Hamm J.J. Technology-assisted healthcare: exploring the use of mobile 3D visualisation technology to augment home-based fall prevention assessments. Ph.D. Thesis. Brunel University London. 2018. 316 p.
9. Papadopoulou A., Crump C., Wilson B. Comprehensive home monitoring system for the elderly. *Wireless Health* 2010. 2010. pp. 214–215.
10. Guan K., Shao M., Wu S. A remote health monitoring system for the elderly based on smart home gateway. *Journal of healthcare engineering*. 2017. vol. 2017. 10 p.
11. Shalkovsky A.G., Kuptsov S.M., Berseneva E.A. [Topical issues of person remote monitoring automated system creation]. *Vrach i informacionnye tekhnologii – Information technologies for the Physician*. 2016. vol. 1. pp. 67–69. (In Russ.).
12. Giannoulis D., Benetos E., Stowell D., Plumbley M.D. IEEE AASP Challenge on Detection and Classification of Acoustic Scenes and Events – Training Dataset for Event Detection Task, subtasks 1 -OL and 2 – OS . Tech. Rep. 2012.

13. Shiryayev V.I. *Issledovanie operacij i chislennye metody optimizacii* [Operations research and numerical optimization methods]. Lenand. 2017. 224 p. (In Russ.).
14. Ventcel' E.S. *Issledovanie operacij* [Operations research]. M.: Sovetskoe Radio. 1972. 552 c. (In Russ.).
15. Ficken F.A. The simplex method of linear programming. Courier Dover Publications. 2015. 64 p.
16. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktury slozhnyh sistem* [Basics of the Structure Synthesis of Complex Systems]. M.: Sovetskoe Radio. 1982. 200 p. (In Russ.).
17. Baranov V.V., Tsvirkun A.D., [Development control: structural analysis, problems, stability]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*. 2018. vol. 79(10). pp. 1780–1796.
18. Corrado A.J. Dynamics of complex systems. CRC Press. 2019.
19. Brinsmead T.S., Hooker C. Complex Systems Dynamics and Sustainability: Conception, Method and Policy. *Philosophy of Complex Systems*. 2011. vol. 10. pp. 809–838.
20. Gadasin V.A., Ushakov I.A. *Nadezhnost' slozhnyh informacionno-upravljajushhih sistem* [Robustness of a complex control information systems]. M.: Sovetskoe Radio. 1975. 191 p.