

УДК 621.391.1

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ю.В. Киселев^a, А.И. Мотиенко^b, О.О. Басов^c, И.А. Сaitov^a

^a Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302015, Российская Федерация

^b Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

^c Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: oobasov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.09.18, принята к печати 30.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1034-1046

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Киселев Ю.В., Мотиенко А.И., Басов О.О., Сaitov И.А. Структурно-функциональная модель интеллектуальной инфокоммуникационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1034–1046. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1034-1046.

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена распределенная терминальная система как основа интеллектуальной инфокоммуникационной системы, ориентированной на анализ поведения пользователей информационного пространства и их комфортное обслуживание. Представлены варианты реализации инфокоммуникационных технологий на основе различных комбинаций модальностей. **Метод.** Для синтеза структуры распределенной терминальной системы использована альтернативно-графовая формализация, в рамках которой различные варианты построения элементов системы задаются в виде вершин альтернативного графа, а дуги отражают характер взаимосвязей между ними. Для определения вариантов построения узлов системы и их взаимосвязей, минимизации затрат на оснащение узлов распределенной терминальной системы аппаратурой предложено использовать алгоритм, основанный на схеме «ветвей» и «границ» и локальной оптимизации. **Основные результаты.** Разработана структурно-функциональная модель распределенной терминальной системы. Представлены теоретические положения для синтеза интеллектуальных инфокоммуникационных систем. **Практическая значимость.** Реализация интеллектуальных инфокоммуникационных систем является перспективным научно-техническим направлением развития национальной информационной инфраструктуры.

Ключевые слова

инфокоммуникационная система, многомодальный интерфейс, распределенная терминальная система, доступность связи, топологическая структура, функциональная структура

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 18-07-00380).

STRUCTURAL-FUNCTIONAL MODEL OF INTELLIGENT INFOCOMMUNICATION SYSTEM

Yu. V. Kiselev^a, A. I. Motienko^b, O.O. Basov^c, I. A. Saitov^a

^aAcademy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol, 302015, Russian Federation

^bSaint Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS (SPIIRAS), Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

^cITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: oobasov@mail.ru

Article info

Received 25.09.18, accepted 30.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1034-1046

Article in Russian

For citation: Kiselev Yu. V., Motienko A. I., Basov O.O., Saitov I. A. Structural-functional model of intelligent infocommunication system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1034–1046 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1034-1046

Abstract

Subject of Research. The paper considers the distributed terminal system (DTS) as the basis for an intelligent infocommunication system, oriented to analyze the behavior of the information space users in the current situation and their

comfortable service. The variants of realization for infocommunication technologies on the basis of various combinations of modalities are presented. **Method.** To solve the problem of DTS structure synthesis, an alternative graphical formalization is used, when various variants of system elements formation are given in the form of the alternative graph vertices, and the arcs present the nature of the interrelations between them. To solve the problem of determining the options for the formation of system nodes and their interrelations and minimizing of the instrumentation cost of the distributed terminal system nodes, it is proposed to use an algorithm based on the "branches" and "borders" scheme and local optimization. **Main Results.** The structural-functional model of the distributed terminal system presented in the paper is a theoretical construction necessary for the development of scientific and methodological tools for the synthesis of intelligent infocommunication systems. **Practical Relevance.** The implementation of intellectual infocommunication systems is a promising scientific and technical direction for the development of the national information infrastructure.

Keywords

infocommunication system, multimodal interface, distributed terminal system, communication availability, topological structure, functional structure

Acknowledgements

The paper was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-07-00380).

Введение

Масштабы инфокоммуникационного взаимодействия пользователей в настоящее время определяются главным образом возможностями абонентских терминалов, имеющих в их распоряжении. Информационная инфраструктура развивается более медленными темпами, чем терминалы пользователей. Для преодоления возникающего разрыва пользователь (исходя из собственных информационных предпочтений и свойств имеющегося терминала) все чаще запрашивает один вид сервиса под названием «соединение с сетью», который подразумевает возможность получения им наиболее *удобного* и *доступного* способа взаимодействия с другим пользователем или информационными ресурсами. Такой подход позволяет рассматривать инфокоммуникационную систему в виде совокупности сложных физических модулей – сети передачи данных (СПД) и абонентских терминалов (рис. 1).

Функции СПД остаются традиционными – перенос информации в виде потока данных между абонентскими терминалами. Последние преобразуют информацию от различных сенсорных систем пользователя к виду, удобному для передачи по СПД в виде блоков данных, и формируют на основе получаемых блоков данных воздействия на сенсорные системы пользователя с учетом его требований к услуге «соединение с сетью».

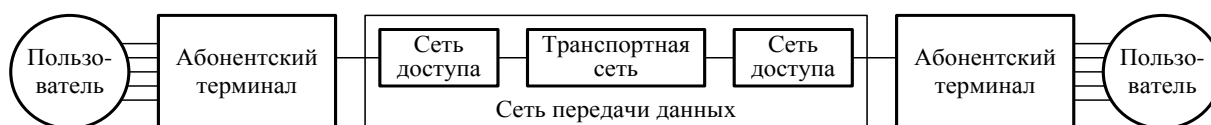


Рис. 1. Функциональное представление инфокоммуникационной системы

Понятие «удобство» реализации определяется в соответствии с индивидуальными предпочтениями и физическими ограничениями пользователя, а также свойствами окружающей среды, в которой происходит коммуникация [1], под доступностью следует понимать возможность получения запрошенной пользователем услуги при некоторых заданных условиях¹.

Исследования показали, что применение многомодальных абонентских интерфейсов существенно приближает «информационный обмен через сеть» к естественной межличностной коммуникации [1]. Так, во время традиционной межличностной коммуникации люди почти всегда взаимодействуют многомодально². Анализ существующих многомодальных интерфейсов, их основных характеристик и областей применения, а также результатов общих исследований в области многомодального взаимодействия и дизайна интерфейсов позволил сделать вывод о возможности повышения удобства процесса взаимодействия пользователей посредством инфокоммуникационной системы за счет многомодального представления информации [1].

Следовательно, актуальна задача повышения доступности взаимодействия пользователей через инфокоммуникационную систему. Если доступность услуги «соединение с сетью» при нахождении пользователя в открытом пространстве в достаточной степени определяется возможностями его абонентского терминала (смартфона, планшета и т.п.) сети доступа, то в ограниченных (локальных) пространствах, в том числе и для обеспечения конфиденциальности (дома, в рабочем кабинете и т.п.), пользователь все чаще желает получать доступ к сети в любой точке без непосредственного использования мобильных устройств.

¹ Рекомендация МСЭ-Т E.800. Определение терминов, относящихся к качеству обслуживания. Утверждено 23.09.2008 г.

² Модальность – физически регистрируемый элемент коммуникации (человеко-машинной и/или межличностной), включающий как собственно передаваемую информацию (сообщение), так и информацию о самом индивиде (его состоянии; отношении к сообщению, к собеседнику, к коммуникации и пр.).

В этой связи возможным является использование в границах таких помещений территориально распределенных устройств, осуществляющих ввод/вывод сигналов различных модальностей, и систем на их основе. Так, для обеспечения пользователя услугой «телефонная связь» в помещении возможно использовать микрофонные и акустические системы¹ [2–5]. Этот и другие варианты применения различных комбинаций входных и выходных модальностей акустического и визуального коммуникативных каналов для обеспечения пользователя коммуникационными технологиями в ограниченных информационных пространствах представлены в таблице.

Распределенная терминальная система как основа интеллектуальной инфокоммуникационной системы

Не ограничиваясь числом используемых модальностей (каналов коммуникации) далее под распределенной терминальной системой (РТС) будем понимать совокупность устройств (подсистем), функционирующих под единым управлением, с целью бесконтактного сбора, обработки и передачи СПД многомодальной информации пользователя, находящегося в локальном пространстве, а также отображения информации требуемого качества, получаемой через инфокоммуникационную систему от других пользователей или информационных ресурсов, в любой точке указанного пространства.

Инфокоммуникационная технология	Модальности акустического канала коммуникации		Модальности визуального канала коммуникации	
	входные	выходные	входные	выходные
Многоканальная аудиозапись	+			
Видеонаблюдение			+	
Аудиовидеозапись	+		+	
Вывод объемного звука, «звук вокруг» и т.п.		+		
Масштабная визуализация, виртуальная реальность, «видео вокруг» и т.п.				+
Распределенная терминальная система телефонной связи	+	+		
Видеолокализация, дополненная реальность			+	+
Распределенная терминальная система видеотелефонной связи	+	+	+	+

Таблица. Варианты реализации инфокоммуникационных технологий на основе различных комбинаций модальностей

РТС представляют собой сложные, иерархические, распределенные, многофункциональные и многоконтурные комплексы с развитыми средствами взаимодействия между узлами коммуникации (рис. 2).

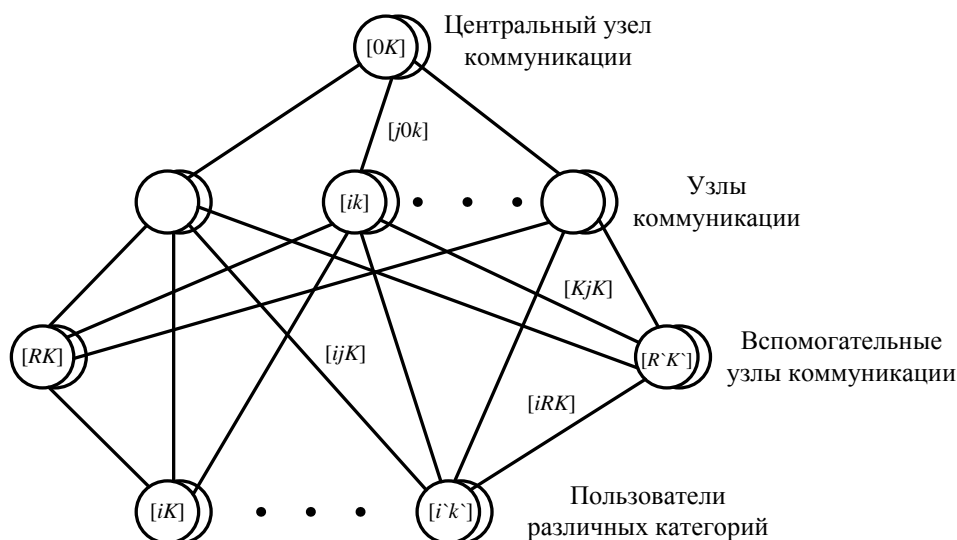


Рис. 2. Обобщенная схема коммуникации пользователей с использованием распределенной терминальной системы

¹ ГОСТ Р 53566-2009 Микрофоны. Общие технические условия. Введ. 01.12.10. М.: Стандартинформ, 2010; ГОСТ 23262-88 Системы акустические бытовые. Общие технические условия. Введ. 01.07.89. М.: Издательство стандартов, 1988.

Под узлом коммуникации будем понимать комплекс аппаратно-программных средств, предназначенных для сбора, обработки, передачи центральному узлу коммуникации, приема от него и отображения информации нескольких (входных и выходных, только входных, только выходных) модальностей. Вспомогательный узел коммуникации отличается от основного тем, что предназначен для сбора, обработки и отображения сигналов, например, когда зоны обслуживания средств сбора (отображения) отдельных модальностей значительно превышают зоны обслуживания средств других модальностей. Так, в рассмотренном примере обеспечения пользователя услугой «телефонная связь» в помещении узлы коммуникации будут содержать аппаратно-программные средства записи и воспроизведения аудиосигналов, а для обеспечения их качественной записи и обработки в различных точках локального пространства потребуется установка дополнительных микрофонов, представляющих собой вспомогательные узлы коммуникации.

Центральный узел коммуникации (рис. 2) предназначен для обработки и передачи многомодальной информации от узлов коммуникации в СПД, а также ее трансляции в обратном направлении.

Естественно, что разным пользователям требуются различные комбинации модальностей. Такие комбинации, реализующие различные функции коммуникации (а в традиционном понимании – различные услуги связи), будут отличаться для разных групп пользователей. В связи с этим такие группы пользователей, использующих идентичные способы взаимодействия с другими пользователем или информационными ресурсами, определим как пользователей различных категорий.

Таким образом, для каждой категории пользователей задается минимальная совокупность узлов, функционирование которых обеспечивает выполнение заданных функций коммуникации (в соответствии с реализуемой услугой). Далее предполагается, что такой совокупностью являются элементы связи, соединяющие пользователя с центральным узлом коммуникации (рис. 2).

Структура интеллектуальной инфокоммуникационной системы и постановка задачи ее синтеза

Под синтезом структуры инфокоммуникационной системы понимается процесс последовательной интеграции основных элементов и частей системы и выбора наилучшего варианта всей системы по заданным критериям.

К настоящему времени в современной науке сложилось три подхода к формализации задач синтеза, отражающих взаимосвязь между исходными данными и представлениями о структуре и функционировании сложной системы [6]:

- 1) синтез структуры системы при заданных алгоритмах ее функционирования (1-й класс задач);
- 2) синтез оптимального поведения и алгоритмов функционирования системы при известной структуре (2-й класс задач);
- 3) синтез структуры и алгоритмов (поведения) функционирования системы, распределения их оптимального состава (3-й класс задач).

К настоящему времени широко применяются достаточно строгие методы:

- синтеза физической структуры СПД при заданных сетевых технологиях в рамках структурно-функционального подхода [6–8];
- обоснования технологии передачи для известной физической структуры СПД в рамках функционально-структурного подхода [9, 10];
- синтеза мультипротокольных СПД, инвариантных к технологии передачи (примыкающие к 3-му классу задач) [11].

Замена физического модуля «абонентский терминал» на РТС актуализирует задачу синтеза структуры последней в условиях разбиения инфокоммуникационной системы на две условно-автономные подсистемы (рис. 1). Естественно, такой подход обуславливает необходимость оптимизации в дальнейшем целого ряда функциональных характеристик элементов СПД для обслуживания многомодальных сообщений от РТС, что потребует новых теоретических исследований в предметной области.

Для решения задачи синтеза структуры РТС воспользуемся альтернативно-графовой формализацией [12, 13], в рамках которой различные варианты построения элементов системы (либо множества таких элементов) задаются в виде вершин альтернативного графа, а дуги отражают характер взаимосвязей между ними.

Пусть G_j – граф, задающий варианты состава и взаимосвязей возможных узлов РТС; $G_j^* \in G_j$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализации узлов РТС с их взаимосвязями. Вершины графа G_j отождествляются с вариантами построения узлов коммуникации, возможными местами их размещения, комплексами аппаратно-программных средств и т.д. Его дуги отражают взаимосвязи между узлами;

G_f – граф взаимосвязей выполнения альтернативных функций (задач, алгоритмов, программ)

коммуникации; $G_I^* \in G_I$ – подграф, задающий один из возможных вариантов реализации функций системы. Вершины графа G_I в зависимости от рассматриваемой задачи отождествляются с процедурами сбора, обработки, передачи в СПД, приема и отображения многомодальной информации и их этапами и т.п. Его дуги отражают информационное взаимодействие между узлами;

\mathfrak{R} – операция отображения графа G_I на G_J , определяющая распределение выполняемых системой функций (задач, алгоритмов, программ) по ее узлам;

n_η ($\eta = \overline{1, \eta_0}$) – характеристики качества создания и функционирования РТС.

Задача синтеза структуры РТС состоит в рациональном отображении множества взаимосвязанных функций на множество взаимосвязанных узлов с соответствующими аппаратно-программными средствами при учете затрат на создание и реконструкцию системы, а также эксплуатацию и функционирование, требований доступности и непрерывности коммуникаций и надежности аппаратно-программных средств и других характеристик:

$$\begin{aligned} \text{extr} \mathfrak{R}_0 \{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{R}^* (G_J^* \in G_J) \}, \\ \mathfrak{R}_\eta \{ (G_I^* \in G_I) \mathfrak{R}^* (G_J^* \in G_J) \}, \quad \eta = \overline{1, \eta_0}, \quad \mathfrak{R}^* \in \mathfrak{R}. \end{aligned} \quad (1)$$

При синтезе РТС результат отображения $(G_I \mathfrak{R} G_J)$ может быть представлен в виде альтернативного графа G_0 вариантов реализации структуры системы. В этом случае задача синтеза структуры в графовой интерпретации состоит в следующем.

Задан альтернативный граф возможных вариантов реализации структуры РТС G_0 , необходимо выбрать подграф $G^* \subset G_0$, оптимизирующий заданные характеристики

$$\mathfrak{R}(G^*) \rightarrow \text{opt} \quad (2)$$

и удовлетворяющий ограничениям, заданным:

– на подграфе в целом

$$\mathfrak{R}_\alpha(G^*) R \mathfrak{R}_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_0}; \quad (3)$$

– на отдельных частях графа

$$G_\mu^* \subset G_\mu \subset G_0, \quad (4)$$

– в том числе на элементах множеств I, J ;

$$\mathfrak{R}_\beta(G_\mu^*) R \mathfrak{R}_\beta, \quad \beta = \overline{1, \beta_0}, \quad \mu = \overline{1, \mu_0}, \quad G_\mu^* \subset G_0, \quad (5)$$

где R – условия вида $\leq, =, \geq$.

Постановки задач синтеза структуры (2)–(5) могут классифицироваться по наличию вариантов построения элементов I и J ; по характеру взаимосвязей между элементами; по свойствам графов G_I , G_J , G_0 ; по виду целевых функций и ограничений.

Решение статической задачи (1)–(5) представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую ряд этапов (рис. 3).

На первом этапе определяется число узлов коммуникации и их расположение, а также состав узлов, обслуживающих различные категории пользователей. При этом минимизируются затраты на организацию узлов с учетом их доступности пользователям, глобальности РТС и ряда других требований.

На втором этапе определяются варианты построения узлов и связей между ними, при этом минимизируются затраты на обеспечение непрерывности связи с учетом заданных вероятностей неблагоприятных внешних воздействий и возможных защитных мероприятий, уточняется состав узлов, обслуживающих различные категории пользователей.

Первые два этапа позволяют выбрать топологическую структуру РТС.

На третьем этапе определяется функциональная структура, т.е. оптимизируется распределение выполняемых функций и задач коммуникации по уровням и узлам системы, а также выбирается комплекс аппаратно-программных средств. При этом минимизируются затраты на оснащение узлов такими средствами и их эксплуатацию и учитываются ограничения на оперативность, аппаратную надежность, вес и энергопотребление аппаратуры, загрузку аппаратно-программных средств узлов и др.



Рис. 3. Общая схема синтеза распределенной терминальной системы интеллектуальной инфокоммуникационной системы

На последующих этапах анализируется динамика работы узлов выбранного варианта РТС с использованием имитационного или натурального моделирования.

После решения статической задачи синтеза структуры РТС может решаться задача синтеза оптимального плана реализации системы.

Выбор топологической структуры распределенной терминальной системы

На первом этапе (рис. 3) исходя из требований к глобальности РТС и доступности узлов коммуникации для различных категорий пользователей определяются минимальная совокупность узлов коммуникации и их размещение.

Доступность узлов определяется в основном параметрами движения пользователей (направление, скорость, время остановки и т.п.) и расположением узлов коммуникации. Доступность задается матрицей $|d_{ij}|$, элементы которой $d_{ij} = 1$, если пользователю i -й категории доступен j -й узел ($j = \overline{1, J}$), $d_{ij} = 0$ в противном случае. Доступность характеризуется временем τ_{ij} максимальной продолжительности сеанса связи между пользователями i -й категории и j -м узлом коммуникации ($j = \overline{1, J}$). Предполагается, что пользователи одной категории идентичны по требованиям к предоставляемым услугам и по параметрам движения.

Отношение общего времени $\tau_i (i = \overline{1, I})$ доступности i -й категории пользователей для РТС ко времени τ нахождения пользователя в заданном локальном информационном пространстве определяет глобальность РТС H_i для i -й категории пользователей.

Задача определения состава узлов коммуникации и их размещения состоит в нахождении минимального числа узлов, а также специальных требований к системе управления РТС (например, доступность пользователя не менее чем для двух узлов).

Определим исходя из доступности пользователей различных категорий для $i = \overline{1, I}$ узлов коммуникации участки $l = \overline{1, L}$, на которых пользователям доступны соответствующие узлы (рис. 4).

Пусть L_i – множество индексов участков, на которых пользователям i -й категории $i = \overline{1, I}$ доступна РТС. Очевидно, что число участков для пользователей i -й категории меньше или равно $2|m_i|$, m_i – множество узлов, доступных для пользователей i -й категории. Время доступности пользователя для узла коммуникации на l -м участке обозначим через $\theta_l (l = \overline{1, L})$.

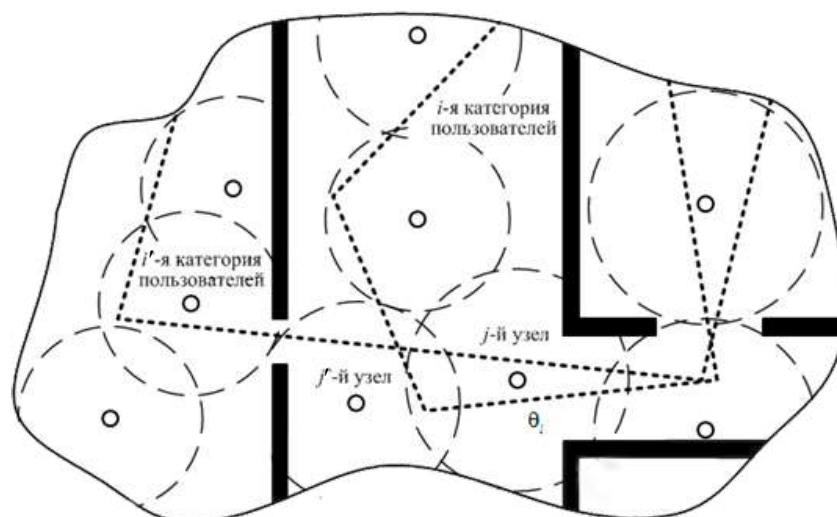


Рис. 4. К вопросу определения доступности пользователей

Введем переменные:

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

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

Задача состоит в минимизации затрат на создание узлов коммуникации

$$\min \sum_{j=1}^J c_j x_j, \quad (6)$$

где c_j – затраты на создание j -го узла коммуникации ($j = \overline{1, J}$); при ограничениях на глобальность системы связи, предоставляемой пользователям различных категорий

$$\sum_{l \in L_i} \theta_l y_l \geq H_i \tau_i, \quad i = \overline{1, I} \quad (7)$$

при специальных ограничениях, например, на число узлов, необходимых для обслуживания пользователей i -й категории

$$\sum_{j \in m_i} x_j \geq k_i, \quad i = \overline{1, I}. \quad (8)$$

Взаимосвязь переменных x_j и y_l задается условиями

$$\sum_{j \in n_l} x_j \geq y_l \geq \frac{1}{|n_l|} \sum_{j \in n_l} x_j, \quad l = \overline{1, I}, \quad (9)$$

где n_l – множество узлов, доступных на l -м участке для пользователей соответствующей категории.

Рассмотренный алгоритм (6)–(9) является линейной целочисленной задачей математического программирования.

На втором этапе для выбранной совокупности узлов РТС и их взаимосвязей устанавливаются варианты построения узлов и связей между ними, обеспечивающие непрерывность связи, определяемой вероятностью выполнения системой функций коммуникации с учетом возможных неблагоприятных внешних воздействий.

Различные варианты построения узлов и связей между ними, направленные на обеспечение непрерывности связи, формализуются в виде альтернативного графа G_j . С этой целью используются увеличение числа узлов и их дублирование, дублирование каналов связи, повышение защищенности узлов и т.д. Каждый вариант построения узлов или линий связи характеризуется затратами на их осуществление и вероятностью выхода из строя за рассматриваемый интервал времени.

Для каждой категории пользователей задается минимальная совокупность узлов, функционирование которых обеспечивает выполнение заданных функций коммуникации. Далее предположим, что такой совокупностью являются элементы связи, соединяющей пользователя с центральным узлом коммуникации

(рис. 2).

Задача определения вариантов построения узлов и связей между ними состоит в минимизации затрат на мероприятия, обеспечивающие выполнение системой функций коммуникации, при ограничениях, характеризующих непрерывность связи для различных категорий пользователей.

Для формализации задачи обозначим через P_{jk} ($k = \overline{1, K_j}, j = \overline{1, J}$), P_{Rk} ($k = \overline{1, K_r}, r = \overline{1, R}$) – вероятности надежной работы соответственно k -го варианта построения j -го узла коммуникации либо R -го вспомогательного узла коммуникации за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных внешних воздействий; индекс $j = 0$ соответствует центральному узлу коммуникации, $j = \overline{1, J}$ – совокупности узлов коммуникации; P_{ijk} , P_{irk} – вероятности успешной работы вариантов реализации каналов коммуникации соответственно между пользователем и узлом коммуникации, между пользователем и вспомогательным узлом коммуникации; P_{Rjk} , P_{j0k} – вероятности успешной работы вариантов каналов связи соответственно между вспомогательным узлом коммуникации и узлом коммуникации, узлом коммуникации и центральным узлом коммуникации за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных воздействий; $P_i^{доп}$ – допустимая вероятность успешной работы РТС для пользователей i -й категории; c_{jk} , c_{Rk} , c_{ijk} , c_{irk} , c_{Rjk} , c_{j0k} – затраты на организацию вариантов построения основных и вспомогательных узлов коммуникации, центрального узла коммуникации и каналов коммуникации (связи).

На альтернативном графе G_j вариантов построения узлов системы и их взаимосвязей выделяются последовательные участки, определяются агрегированные варианты построения выделенных участков и их характеристики. При этом из графа G_j исключаются агрегированные варианты участков, над которыми доминируют оставшиеся. Поэтому при формализации задачи далее используются агрегированные варианты для последовательных участков.

Введем переменные:

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

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

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

Задача выбора вариантов построения элементов графа G_j состоит в минимизации затрат

$$\min \left(\sum_k c_{jk} x_{jk} + \sum_k c_{irk} x_{irk} + \sum_k c_{ijk} x_{ijk} + \sum_k c_{jRk} x_{jRk} + \sum_k c_{j0k} x_{j0k} \right) \quad (10)$$

при ограничениях

$$P_{Rk}(x_{Rk}, x_{irk}) \left(1 - P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) \right) + \left(1 - P_{Rk}(x_{Rk}, x_{irk}) \right) \left(1 - P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) \right) \geq P_i^{доп},$$

$$\sum_k x_{jk} = 1, \quad \sum_k x_{irk} = 1, \quad \sum_k x_{ijk} = 1, \quad \sum_k x_{jRk} = 1, \quad \sum_k x_{j0k} = 1,$$

где $P_{Rk}(x_{Rk}, x_{irk}) = \left(\sum_k P_{Rk} x_{Rk} \right) \left(\sum_k P_{irk} x_{irk} \right);$

$$P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(1 - \sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left(1 - \sum_k P_{Rjk} x_{Rjk} \right) \left(\sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right];$$

$$P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) = \prod_j \left[1 - \left(\sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left(\sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right].$$

Для решения задачи (10) может быть использован алгоритм, основанный на схеме «ветвей и границ» [14, 15].

Выбор функциональной структуры распределенной терминальной системы. Для найденного множества узлов коммуникации, обслуживающих пользователей различных категорий, и заданных

функций коммуникаций по каждой категории пользователей определяется оптимальное распределение задач взаимосвязанных подсистем по уровням и узлам системы и выбирается комплекс аппаратно-программных средств. Функции коммуникации задаются в виде множества задач, выполняемых различными подсистемами РТС. Для пользователей различных категорий задаются варианты реализации задач, выполняемых подсистемами, и их распределения по уровням и узлам системы (рис. 5).

Необходимо так распределить задачи по уровням и узлам системы и выбрать такой набор аппаратно-программных средств, чтобы минимизировать затраты на оснащение узлов аппаратно-программными средствами и их эксплуатацию при выполнении ограничений по оперативности, аппаратурной надежности, массе и энергопотреблению аппаратуры, загрузке узлов и др.

Варианты распределения функций и задач по уровням и узлам системы формализуются в виде совокупности взаимосвязанных альтернативных графов G_0 . Специфика РТС заключается в том, что каждый путь отдельного альтернативного графа соответствует некоторому варианту построения соответствующей подсистемы РТС. Подграф, состоящий из набора путей альтернативных графов, задает структуру всей системы.

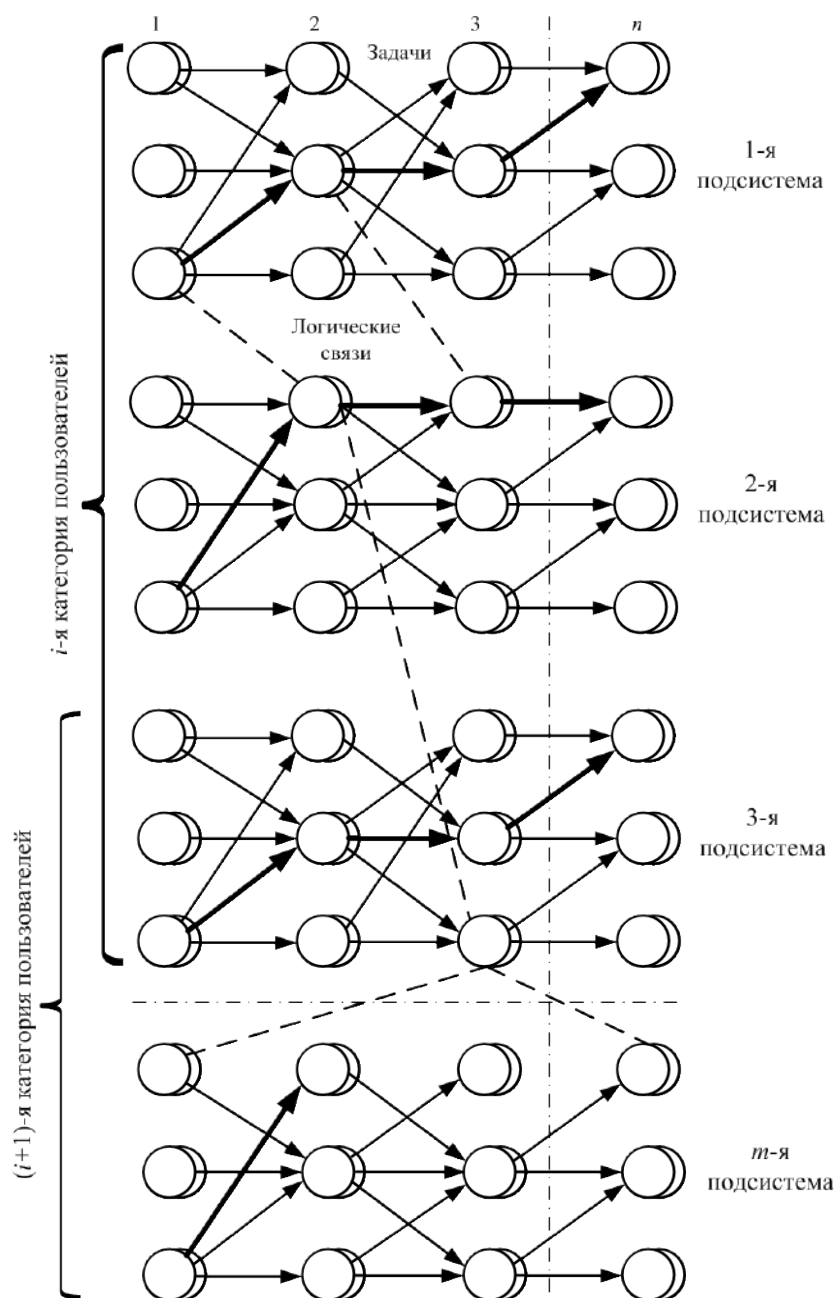


Рис. 5. Распределение задач по уровням и узлам системы

В общем случае задача распределения функций и комплекса аппаратно-программных средств по

уровням и узлам системы формулируется в следующем виде.

Пусть Π_{im} – путь альтернативного графа G_0 вариантов построения m -й ($m = \overline{1, M}$) подсистемы РТС для i -й категории пользователей ($i = \overline{1, I}$). Обозначим через F_0 целевую функцию, значение которой определяется выбранной совокупностью вариантов построения отдельных подсистем, т.е. $F_0(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM})$.

Тогда задача синтеза оптимальной функциональной структуры РТС запишется в виде

$$\text{extr } F_0(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}), \quad (11)$$

при ограничениях для всех подсистем, обслуживающих всех пользователей,

$$F_\alpha(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}) \leq B_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, \alpha_0}; \quad (12)$$

ограничениях по совокупности подсистем, обслуживающих одного пользователя,

$$F_\beta(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{IM}) \leq B_\beta, \quad \beta = \overline{1, \beta_0}, \quad i = \overline{1, I}; \quad (13)$$

ограничениях по отдельным подсистемам

$$F_\gamma(\Pi_{im}) \leq B_{\gamma im}, \quad \gamma = \overline{1, \gamma_0}, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (14)$$

$$\Pi_{im} \in G_0. \quad (15)$$

В разрабатываемой РТС минимизируются затраты на оснащение узлов аппаратурой. В качестве ограничений (12) выступает загрузка аппаратно-программных средств узлов различных уровней; в качестве (13) – допустимые массогабаритные показатели и энергопотребление; в качестве (14) – оперативность и аппаратурная надежность по различным подсистемам. Условия (15) учитывают взаимосвязи логического типа.

Пусть $x_{nku}^{im} = 1$, если при обслуживании i -го пользователя k -й вариант n -й задачи m -й подсистемы выполняется на u -м уровне, и $x_{nku}^{im} = 0$ – в противном случае. Совокупность индексов $\{imnku\}$ однозначно определяет тип используемых средств l ($l = \overline{1, L}$).

Пусть y_{lju} – целочисленная переменная, равная числу комплексов аппаратуры l -го типа, используемой в j -м узле на u -м уровне. Переменные y_{lju} однозначно определяются выбранной совокупностью переменных x_{nku}^{im} .

Пусть также λ^{im} – частота выполнения задач m -й подсистемой при обслуживании i -го пользователя; t_{nku}^{im} – время выполнения k -го варианта n -й задачи m -й подсистемы выполняется на u -м уровне при обслуживании i -го пользователя; ρ_{lu} – допустимая загрузка аппаратно-программных средств l -го типа на u -м уровне.

Очевидно, что

$$\sum_{imnk} \lambda^{im} t_{nku}^{im} x_{nku}^{im} \leq \rho_{lu} y_{lju}, \quad l = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, J}.$$

С учетом введенных переменных формализована нелинейная задача математического программирования с целочисленными переменными. Поскольку в оптимальное решение входит лишь один из возможных путей каждого альтернативного графа варианта построения подсистем РТС, перейдем от переменных x_{nku}^{im} к агрегированным:

$$x_{im}^\mu = \begin{cases} 1, & \text{если для построения } m\text{-й подсистемы, обслуживающей} \\ & i\text{-го пользователя, выбирается } \mu\text{-й вариант;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Очевидно, что

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{im}^\mu = 1, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}.$$

Для характеристик вариантов построения подсистем введем следующие обозначения: t_{mi}^μ – оперативность; R_{mi}^μ – аппаратурная надежность; P_{mi}^μ – масса аппаратуры; E_{mi}^μ – энергопотребление

аппаратуры; b_{mi}^{μ} – затраты на эксплуатацию аппаратуры; ρ_{kimj}^{μ} – загрузка аппаратно-программных средств l -го типа j -го узла в μ -м варианте построения подсистемы (mi) . Данные характеристики определяются через введенные выше характеристики для отдельных задач, выполняемых подсистемами РТС.

Переменная y_{lju} равна числу комплексов аппаратуры l -го типа, которой оснащается узел j ($j = \overline{1, J}$) на u -м уровне ($u = \overline{1, u_0}$), и однозначно определяется выбранной совокупностью вариантов построения подсистем РТС (набором переменных x_{mi}^{μ}). С учетом введенных обозначений и переменных задача (11)–(15) запишется в виде

$$\min \left(\sum_{l,j,u} c_l y_{lju} + \sum_{m,i,\mu} b_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \right); \quad (16)$$

$$\sum_{mi} \left(\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \rho_{milu}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \right) \leq y_{lju} \rho_l, \quad l = \overline{1, L}, j = \overline{1, J}, u = \overline{1, u_0}; \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L P_l y_{lju} \leq P_{ju}^{\text{доп}} \quad \text{для заданных } (j^u); \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^L E_l y_{lju} \leq E_{ju}^{\text{доп}} \quad \text{для заданных } (j^u); \quad (19)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} t_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \leq t_{mi}^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (20)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} \ln R_{mi}^{\mu} x_{mi}^{\mu} \geq \ln R_{mi}^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (21)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_0} x_{mi}^{\mu} = 1, \quad i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (22)$$

$$\prod_{\mu^* m^* i^* \in V_{mi}^{\mu}} \left(x_{m^* i^*}^{\mu^*} - 1 \right) x_{mi}^{\mu} = 0 \quad \text{для заданных } (\mu^* m^* i^*); \quad (23)$$

$$\sum_{\mu^* m^* i^* \in W_{mi}^{\mu}} \left(x_{m^* i^*}^{\mu^*} - 1 \right) x_{mi}^{\mu} = 0 \quad \text{для заданных } (\mu^* m^* i^*). \quad (24)$$

В выражении (16) первое слагаемое учитывает затраты на оснащение узлов аппаратурой, приведенные к соответствующей единице времени с учетом нормативных коэффициентов, а второе слагаемое – затраты на эксплуатацию аппаратуры. В выражении (17) ρ_l – допустимая загрузка одного комплекта аппаратуры l -го типа. В выражениях (18)–(21) $P_{ju}^{\text{доп}}$, $E_{ju}^{\text{доп}}$, $t_{mi}^{\text{доп}}$, $R_{mi}^{\text{доп}}$ – допустимые значения массы, энергопотребления, оперативности и аппаратурной надежности соответственно. Ограничения (23) и (24) учитывают логические взаимосвязи типа «И» и «ИЛИ» между вариантами построения подсистем: V_{mi}^{μ} – множество индексов вариантов, которые должны быть выбраны, если выбирается μ -й вариант m -й подсистемы для i -й категории пользователей, а W_{mi}^{μ} – множество индексов вариантов, среди которых будет выбран один, если выбирается μ -й вариант m -й подсистемы для i -й категории пользователей.

Для решения задачи (16)–(24) может быть использован алгоритм, основанный на схеме «ветвей» и «границ» и локальной оптимизации.

Заключение

Реализация интеллектуальных инфокоммуникационных систем является перспективным научно-техническим направлением развития национальной информационной инфраструктуры. Представленная модель распределенной терминальной системы обеспечивает научно-методические основы синтеза

интеллектуальных инфокоммуникационных систем. В свою очередь, решение задач синтеза топологической (10) и функциональной (20)–(28) структур распределенной терминальной системы позволит на следующих этапах построения такой системы:

- 1) разработать технологию сбора, преобразования, обновления, распределения, передачи и отображения информации;
- 2) выбрать рациональную организацию входных, промежуточных и выходных информационных массивов;
- 3) выбрать аппаратно-программные средства узлов коммуникации для сбора, отображения и выполнения необходимых преобразований информации;
- 4) разработать подсистему управления распределенной терминальной системы, обеспечивающую сопровождение и обслуживание пользователя локального пространства узлами коммуникации.

Решение указанного комплекса задач позволит реализовать распределенную терминальную систему, обеспечив доступ пользователя к сети передачи данных в любой точке локального пространства без непосредственного использования мобильных устройств, тем самым реализовав *доступный* способ взаимодействия с другим пользователем или информационными ресурсами.

Литература

1. Басов О.О., Карпов А.А., Сайтов И.А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления. Орёл: Академия ФСО России, 2015. 277 с.
2. Вахитов Ш.Я. Современные микрофоны. Теория, проектирование. СПб: СПбГУКиТ, 2003. 394 с.
3. Вахитов Ш.Я., Вахитов Я.Ш. Микрофоны. Телефоны. Гарнитур. Теория, расчет, конструирование, эксплуатация. СПб: СПбГУКиТ, 2010. 261 с.
4. Вахитов Ш.Я., Фадеев А.А., Ковалгин Ю.А., Щевьев Ю.П. Акустика: учебник для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2009. 660 с.
5. Вахитов Ш.Я. Электроакустика. СПб: СПбГИКиТ, 2015. 210 с.
6. Царегородцев А.В., Кислицын А.С. Основы синтеза защищенных телекоммуникационных систем. М.: Радиотехника, 2006. 256 с.
7. Степанов С.Н. Основы телеграфика мультисервисных сетей. М.: Эко-Трендз, 2010. 392 с.
8. Ямпольский В.З., Комагоров В.П., Солдатов В.Н. Моделирование сетей передачи и обработки информации. Новосибирск, 1986. 137 с.
9. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем. М.: Высшая школа, 2006. 511 с.
10. Николаев Ю.И. Проектирование защищенных информационных технологий. СПб: СПбГТУ, 1997. 312 с.
11. Сайтов И.А. Основы теории построения защищенных мультипротокольных оптических транспортных сетей телекоммуникационных систем. Орёл: Академия ФСО России, 2008. 220 с.
12. Ронжин А.Л., Басов О.О., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 11. С. 897–905. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-897-905
13. Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Полимодельное описание и анализ структурной динамики систем управления космическими средствами // Труды СПИИРАН. 2010. № 15. С. 7–52.
14. Цвиркун А.Д., Акиндиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем (синтез и планирование развития). М.: Наука, 1993. 160 с.
15. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Советское радио, 1982. 200 с.

Авторы

Киселев Юрий Владимирович – сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, 302015, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5270-7364, Kiselev-yuri@yandex.ru

Мотиенко Анна Игоревна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский институт

References

1. Basov O.O., Karpov A.A., Saitov I.A. *Methodological Bases of Synthesis of Multimodal Communication Systems of Public Administration*. Orel, Akademiya FSO Rossii Publ., 2015, 277 p. (in Russian)
2. Vakhitov Sh.Ya. *Modern Microphones. Theory, Design*. St. Petersburg, SPbSUFT Publ., 2003, 394 p. (in Russian)
3. Vakhitov Sh.Ya., Vakhitov Ya.Sh. *Microphones. Phones. Headsets. Theory, Calculation, Design, Operation*. St. Petersburg, SPbSUFT Publ., 2010, 261 p. (in Russian)
4. Vahitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A., Fadeev A.A., Shchev'ev Yu.P. *Acoustics*. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom, 2009, 660 p. (in Russian)
5. Vakhitov Sh.Ya. *Electroacoustics*. St. Petersburg, SPbSUFT Publ., 2015, 210 p. (in Russian)
6. Tsaregorodtsev A.V., Kislitsyn A.S. *Bases of the Synthesis of Secure Telecommunications Systems*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006, 256 p. (in Russian)
7. Stepanov S.N. *Bases of Teletraffic Multiservice Networks*. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2010, 392 p.
8. Yampol'skii V.Z., Komagorov V.P., Soldatov V.N. *Modeling of Information Transfer and Processing Networks*. Novosibirsk, 1986, 137 p. (in Russian)
9. Volkova V.N., Denisov A.A. *Systems Theory*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2006, 511 p. (in Russian)
10. Nikolaev Yu.I. *Design of Secure Information Technologies*. St. Petersburg, SPbSUFT Publ., 1997, 312 p. (in Russian)
11. Saitov I.A. *Fundamentals of the Theory of Secure Multiprotocol Optical Transport Networks of Telecommunication Systems*. Orel, Akademiya FSO Rossii, 2008, 220 p. (in Russian)
12. Ronzhin A.L., Basov O.O., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Conceptual and formal models of synthesis of cyber-physical systems and cyber-physical intellectual spaces. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 897–905. doi: 10.17586/0021-3454-2016-59-11-897-905 (in Russian)
13. Sokolov B.V., Yusupov R.M. Multiple-model description and structure dynamics analysis of space-facilities control systems. *SPIIRAS Proceedings*, 2010, no. 15, pp. 7–52. (in Russian)
14. Tsvirkun A.D., Akindiev V.K. *Structure of Multi-Level and Large-Scale Systems (Synthesis and Development Planning)*. Moscow, Nauka Publ., 1993, 160 p. (in Russian)
15. Tsvirkun A.D. *Basics of the Structure Synthesis of Complex Systems*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1982, 200 p. (in Russian)

Authors

Yuriy V. Kiselev – employee, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol, 302015, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5270-7364, Kiselev-yuri@yandex.ru

Anna I. Motienko – PhD, Senior scientific researcher, Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS (SPIIRAS),

информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, Scopus ID: 57190251781, ORCID ID: 0000-0002-0315-9485, anna.gunchenko@gmail.com

Басов Олег Олегович – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 16400670700, ORCID ID: 0000-0001-5788-4845, oobasov@mail.ru

Сайтов Игорь Акрамович – доктор технических наук, профессор, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302015, Российская Федерация, Scopus ID: 26533482500, ORCID ID: 0000-0002-1436-7634, akramovish@mail.ru

Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, Scopus ID: 57190251781, ORCID ID: 0000-0002-0315-9485, anna.gunchenko@gmail.com

Oleg O. Basov – D.Sc., Associate Professor, Senior scientific researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 16400670700, ORCID ID: 0000-0001-5788-4845, oobasov@mail.ru

Igor A. Saitov – D.Sc., Professor, employee, Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation, Oryol, 302015, Russian Federation, Scopus ID: 26533482500, ORCID ID: 0000-0002-1436-7634, akramovish@mail.ru