

Труды МАИ. 2024. № 137
Trudy MAI, 2024, no. 137

Научная статья
УДК 519.17, 004.738
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181887>

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ ГЕТЕРОГЕННОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

**Расул Ахматович Кочкаров¹, Михаил Тимурович Балдычев²,
Андрей Михайлович Казанцев³✉, Светлана Васильевна Прокопчина⁴
Александр Васильевич Тимошенко⁵**

^{1,2,4,5}Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
Москва, Россия

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

¹rasul_kochkarov@mail.ru

²m.baldytchev@yandex.ru

³kazantsev.andrei@gmail.com ✉

⁴svprokopchina@fa.ru

⁵u567ku78@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные вопросы по повышению эффективности функционирования сложно-структурированных пространственно-распределенных систем мониторинга. Синтез рациональных количественных и качественных конфигураций функционирования подобных систем требует исследования структурно-функциональной устойчивости и целостности сети

передачи данных, а в случае разнородных информационных средств системы мониторинга – гетерогенной сети передачи данных. Для их исследования предложено использовать динамические графовые структуры со свойствами иерархичности из-за необходимости исследования указанных характеристик системы в режиме реального времени, что достигается за счет возможности независимой работы алгоритмов оценки состояния на отдельных подграфах – подсистемах пространственно-распределенной системы мониторинга. По результатам оснований разработан алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга, адаптированный под независимую (параллельную) работу с ее подсистемами.

Ключевые слова: пространственно-распределенная система мониторинга, структурно-функциональная устойчивость, динамический граф, гетерогенная сеть передачи данных

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10084, <https://rscf.ru/project/23-69-10084/>

Для цитирования: Кочкаров Р.А., Балдычев М.Т., Казанцев А.М., Прокопчина С.В., Тимошенко А.В. Алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181887>

Original article

ALGORITHM FOR ASSESSMENT OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL STABILITY AND INTEGRITY OF HETEROGENEOUS DATA TRANSMISSION NETWORK OF SPATIALLY DISTRIBUTED MONITORING SYSTEM

Rasul A. Kochkarov¹, Mikhail T. Baldytchev², Andrey M. Kazantsev³✉, Svetlana V. Prokopchina⁴, Alexander V. Timoshenko⁵

^{1,2,4,5}Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

¹rasul_kochkarov@mail.ru

²m.baldytchev@yandex.ru

³kazantsev.andrei@gmail.com ✉

⁴svprokopchina@fa.ru

⁵u567ku78@gmail.com

Abstract. Modern communication and data transmission technologies make it possible to form spatially distributed monitoring systems (SDMS) with a significant number of heterogeneous information means forming a heterogeneous data transmission network (HDTN) and allowing to control objects of different nature.

When designing and studying the functioning of such complex SDMS, as a rule, the processes of information and network interaction are considered separately. However, modern trends in the organization of information-network interaction between the elements of SDMS require a unified consideration in terms of its functionality, i.e. the

transfer of specific information between the elements of the system, taking into account the organization of communication HDTN through its elements (mobile sensors and receiving and transmitting devices).

The essential characteristics of information transmission in such networks are its completeness (volume), reliability (share of distortion) and timeliness (speed of delivery), which in turn depend on many external and internal factors.

The influence of such factors on the system operation can be manifested both in the violation of structural and functional stability HDTN by destroying the processes of informational (changing the volume of transmitted information and the share of distortions) interaction, and the integrity of the system by violating the network (switching) interaction (blocking of individual sensors and repeaters).

The paper considers the issues proposed algorithm demonstrating the fundamental possibility of joint representation and analysis of structural and functional stability and integrity of HDTN in order to synthesize rational quantitative and qualitative configurations of functioning of SDMS under the influence of destabilizing factors of different intensity.

Its peculiarity is the operations of placing and destroying centers, which allow us to study the structural and functional stability of dynamic graph structures with hierarchical properties. The center search operation in the form of a procedure is described in detail as the most computationally intensive one. We prove the consistency of the procedure in the form of a theorem and calculate its computational complexity, which is much lower than the known algorithms for center search due to the special properties of hierarchy.

Keywords: spatially distributed monitoring system, structural and functional stability, dynamic graph, heterogeneous data transmission network.

Funding: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-69-10084, <https://rscf.ru/project/23-69-10084/>

For citation: Kochkarov R.A., Baldychev M.T., Kazantsev A.M., Prokopchina S.V., Timoshenko A.V. Algorithm for assessment of structural and functional stability and integrity of heterogeneous data transmission network of spatially distributed monitoring system. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181887>

Введение

Современные технологии связи и передачи данных позволяют формировать пространственно-распределенные системы мониторинга (ПРСМ) со значительным количеством разнородных информационных средств, образующих гетерогенную сеть передачи данных (ГСПД) и позволяющих контролировать объекты различной природы. Примерами подобных систем могут являться:

- комплексная система мониторинга качества окружающей среды (реализуется в рамках Государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 326) и национального проекта «Экология»);

- комплексная система распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания (реализуется в рамках контрольно-надзорной деятельности

территориальных органов и мониторинга средств массовой информации и массовых коммуникаций в части соблюдения законодательства Российской Федерации в сфере связи), обобщённая структурная схема представлена на рис. 1.

При проектировании и исследовании функционирования подобных сложных ПРСМ, как правило, процессы информационного и сетевого взаимодействия рассматриваются отдельно. Это, в свою очередь, приводит к разработке и использованию различных показателей оценки информационного и сетевого взаимодействия ПРСМ [1-4]. Более того, подвижные элементы ПРСМ могут, благодаря своим техническим характеристикам, одновременно совмещать функции – функции сенсоров, приемно-передающих устройств, и устройств центрального управления.

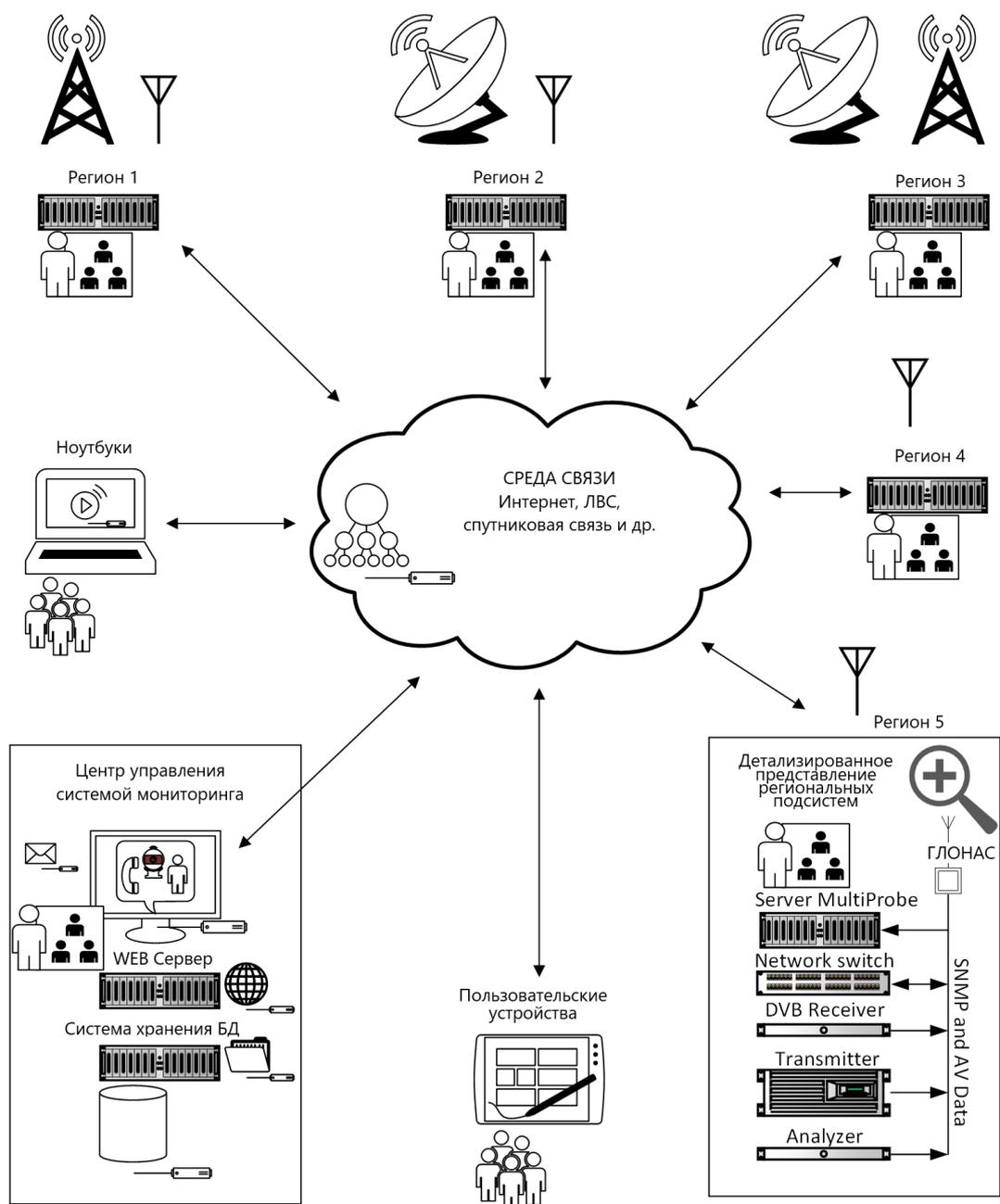


Рисунок 1. Комплексная система распределенного мониторинга и записи теле- и радиовещания

Однако, современные тенденции организации информационно-сетевого взаимодействия между элементами ПРСМ требуют единого рассмотрения с точки зрения ее функционала, т.е. передачи конкретной информации между элементами системы с учетом организации коммуникационной ГСПД посредством ее элементов

(подвижных сенсоров и приемно-передающих устройств). При этом существенными характеристиками передачи информации является ее полнота (объем), достоверность (доля искажения) и своевременность (скорость доведения), которые в свою очередь зависят от множества внешних и внутренних факторов:

- большое количество слабо формализуемых и зачастую противоречивых целей функционирования, определяемых предметной областью системы, с одновременной их изменчивостью (ситуативностью) во времени;

- конфликтный и многоаспектный характер функционирования при значительном влиянии человеческого фактора;

- преимущественно понятийный и противоречивый характер исходных описаний условий функционирования и возможных ограничений.

Влияние перечисленных факторов на работу системы может проявляться как в нарушении структурно-функциональной устойчивости ГСПД путем разрушения процессов информационного (изменение объема передаваемой информации и доли искажений) взаимодействия, так и целостности системы путем нарушения сетевого (коммутационного) взаимодействия (блокирование отдельных сенсоров и ретрансляторов).

Одним из путей снижения влияния данных факторов на работу системы мониторинга является гибкое распределение ее ресурсов, предусматривающее выбор способа применения, объем и интенсивность использование элементов системы и многих других параметров, максимизирующих эффективность ее работы [5-8].

Постановка задачи

Ввиду того, что основной задачей ПРСМ является мониторинг состояния объектов, одним из показателей ее эффективности может служить объем получаемой об этих объектах информации $|\langle b_i \rangle_m|$, где $\langle b_i \rangle_m, i = 1(1)m, b_i \in \{0,1\}$ – единичные элементы информационного пространства контролируемого m -го объекта, который зависит, как от состояния и поведения самих объектов мониторинга, так и от состояния ПРСМ. При этом, исходя из специфики рассматриваемой задачи, состояние и поведение объектов мониторинга является экзогенным, поэтому в рамках статьи принято ограничение на объем получаемой информации только количественных и качественных конфигураций функционирования ПРСМ [9].

При указанном ограничении, достижение максимума объема информации о контролируемых объектах сводится к поиску рациональной упорядоченной пары композиции отношений – рациональной конфигурации ПРСМ:

$$\begin{aligned} \exists (k_m, p_j) : K_{mi} \circ P_{ij} \mid k_m \in K_{mi}, \\ p_j \in P_{ij} \rightarrow \max(|\langle b_i \rangle_m|), \end{aligned}$$

где K_{mi} – множество количественных конфигураций k_m ПРСМ, при $i = 1(1)m$; P_{ij} – множество векторов технических параметров p_j элементов ПРСМ, при $j = 1(1)m$.

Поиск рациональной конфигурации ПРСМ предполагает анализ состояния системы по большому количеству параметров, в том числе и в режиме реального времени [10]. Одним из срезов состояния ПРСМ является структурно-

функциональная устойчивость и целостность ГСПД. В работе под структурной устойчивостью понимается способность системы сохранять структурную связность. При этом свойство устойчивости определяет способность системы функционировать с заданными параметрами в условиях воздействия дестабилизирующих факторов [11-14].

Исследование структурно-функциональная устойчивость и целостность ГСПД в сложно-структурированных распределенных системах, к которым относится ПРСМ, возможно за счет применения динамических графовых структур со свойствами иерархичности. В частности, путем разработки теоретико-графовой модели ПРСМ, позволяющей исследовать изменения, происходящие в структурно-функциональном состоянии ГСПД ПРСМ при ее функционировании под воздействием деструктивных факторов различной интенсивности, как естественного, так и искусственного характера, что влияет на устойчивость. В терминологии теории графов, деструктивное воздействие можно описать как нарушение функциональности двух видов:

- частичное нарушение (снижение весовых характеристик, например, пропускной способности канала связи), в случае которого сохранение функциональности системы возможно за счет частичного перераспределения потоков информации решением многокритериальной задачи маршрутизации и др. (например, как в [15,16]);

- структурное нарушение (удаление ребер и вершин графа), нарушающее целостность системы, для восстановления которой необходимо решение задачи

структурного восстановления и формирования новых связей с оптимальными критериями (время формирования канала-ребра, пропускная способность, надежность и др.) [17].

Данная модель может быть представлена в виде иерархического графа G_L , состоящего из подграфов разных рангов G_i , где граф $G_L = (V_L, E_L)$ – представляет собой *физическую структуру сети* с узлами $V = \{v_i\}$ и каналами связи $E = \{e_{ij}\}$ между ними. Придание весов вершин и ребрам на момент времени t формирует матрицу Λ_t распределения информационных потоков между узлами сети. Наложение матрицы Λ_t на граф $G_L = (V_L, E_L)$ отражает *информационную структуру сети* на момент времени t . В свою очередь *конфигурация системы связи* $S_t = \{\Lambda_t, G_L\}$ – отражает текущее состояние системы связи с заданными структурными и весовыми значениями элементов графа G_L в момент времени t . Подробно данная модель описана в [18].

На рисунке 2 показан пример структуры графа ПРСМ. На первом уровне это выделенные каналы связи национального и региональных операторов связи с высокой пропускной способностью и надежностью, на втором – телекоммуникационные системы с едиными характеристиками, а на третьем – вторичные сети и сети абонентского доступа. При этом следует говорить о динамическом графе, так как в составе каналов связи присутствуют радиоканалы, сотовые и другие мобильные передвижные сети связи. Весовые и структурные характеристики элементов и подграфов сети G_L меняются в зависимости от ранга

$l = 1, 2, \dots, L$ и коэффициента подобия $\theta \sim l$. Важными структурными характеристиками, как было сказано выше, являются целостность и устойчивость, в том числе подграфов (подсистем) как составных частей.

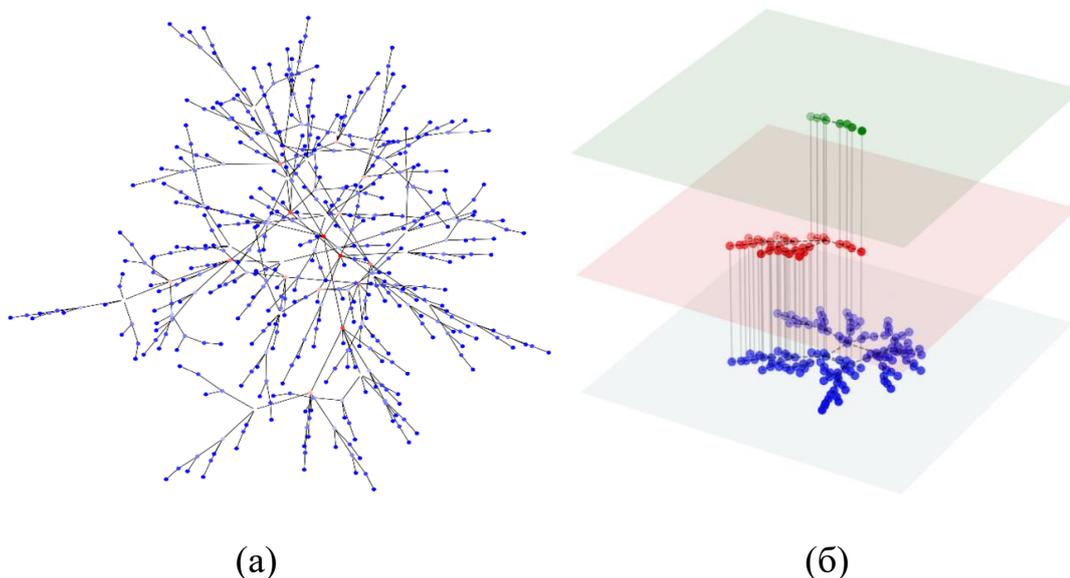


Рисунок 2. Структура графа G_L (а), представленная в виде иерархий (б)

Изменение графа G_l в процессе функционирования ПРСМ, в том числе под влиянием дестабилизирующих факторов, отражается на структурно-топологических свойствах и характеристиках ПРСМ. Для понимания текущего состояния и происходящих изменений ПРСМ, а также оперативного управления ПРСМ необходимо отслеживать изменения всех структурных метрик.

В работе [18] предложен агрегированный топологический индекс (АТИ), состоящий из структурно-топологических метрик ПРСМ, сведенных в единое нормированное пространство и отражающее текущее состояние. Изменения G_l отражаются, как в составляющих метриках, так и в самом индексе АТИ. По сути, индекс АТИ непрерывно сигнализирует о статусе ПРСМ – сообщает о нахождении

состояния ПРСМ в заданных пределах. В случае отклонения значений АТІ от требуемых по его составных метрикам выявляется в какой части произошло отклонение. Рассматривается как равномерно отклонение всех составляющих или значительное отклонение одной или нескольких метрик АТІ.

Таким образом, теоретико-графовая модель позволяет представить формализованное описание структурного положения ПРСМ во времени, а индекс АТІ и его метрики отражает структурное состояние ПРСМ в заданный момент времени. Однако, для синтеза рациональных количественных и качественных конфигураций функционирования ПРСМ необходима разработка алгоритмов оптимизации работы ПРСМ, направленных на повышение структурно-функциональной устойчивости и целостности ГСПД в условиях воздействия дестабилизирующих факторов различной интенсивности, чему и посвящена данная статья.

Алгоритм оценивания (обеспечения) структурно-функциональной устойчивости и целостности ГСПД ПРСМ

Для обеспечения структурно-функциональной устойчивости и целостности ГСПД ПРСМ предлагается итерационный алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке. 3. Его особенностью являются *операции размещения и разрушения центров*, которые позволяют исследовать структурно-функциональную устойчивость динамических графовых структур со свойствами иерархичности.

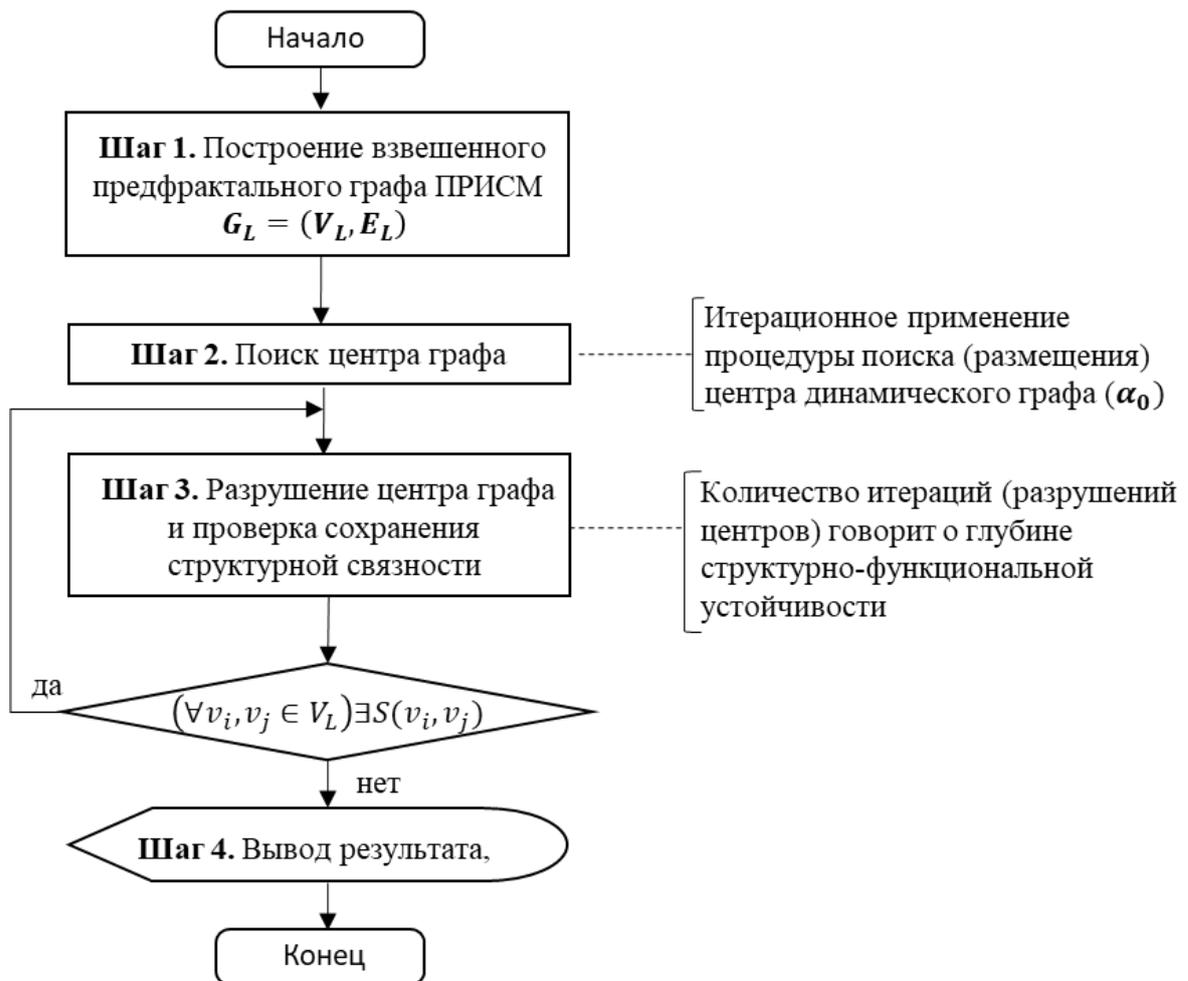


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма оценивания структурно-функциональной устойчивости и целостности ПРСМ

Центр графа отражает вершину с лучшим набором кратчайших путей до всех остальных вершин, при этом кратный центр состоит из множества вершин. В многокритериальном случае определение кратного центра и процедура его поиска может быть расширено. По сути узлы ПРСМ, являющиеся центрами, соединяют через себя информационные маршруты. Выход из строя центра может приводит к кратковременным или фатальным перебоям работоспособности ПРСМ. В случае деструктивного воздействия такие узлы подвергаются наибольшему влиянию,

поэтому важно понимать, какие узлы являются центрами и прогнозировать поведение ПРСМ в случае их удаления. Многократная операция удаления вершин позволяет прогнозировать последствия и вычислять устойчивость такого деструктивного воздействия.

Алгоритм итерационно находит центр графа, который далее удаляется и следует проверка сохранения структурной связности (сохранения единой компоненты связности) и функциональности. Количество итераций (разрушений центров) говорит о **глубине** структурно-функциональной устойчивости ГСПД ПРСМ. Шаг разрушения центра, после которого нарушается структурная или функциональная связность, соответствует **показателю целостности** ГСПД ПРСМ. ГСПД находится в состоянии целостности, если текущий граф является связным. Как только граф распадается на несколько несвязных компонент, нарушается целостность. Наиболее трудоемким этапом представленного алгоритма является *процедура размещения центра динамического графа* со свойствами иерархичности.

Процедура размещения центра структурно-динамического графа ПРСМ

Процедура поиска (размещения) центра динамического графа (α_0) работает на графе G_L при условии сохранения смежности старых ребер. Предлагается краткое описание процедуры для одного фиксированного набора весов $w_i(e)$ из $M, i = \overline{1, M}$.

Процедура α_0 обрабатывает подграфы L -го ранга [19], $s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$. Для всех общих вершин подграфов L -го ранга выделяются числа разделения

$s(x_{s_L}^{(L)}) = \max_{j_L=1,2,\dots,n-1} d(x_{s_L}^{(L)}, v_{j_L}^{(L)})$. Поиск кратчайшего пути выполняется с помощью известного алгоритма Дейкстры [20]. Таким же способом выделяются числа разделения $s(x_{s_l}^{(l)})$ для общих вершин $x_{s_l}^{(l)}, s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$ подграфов l -го ранга $l = L-1, L-2, \dots, 2$ до 2-го ранга включительно.

На шаге L на подграф-затравке первого ранга выделяются числа разделения для всех вершин $x_{s_1}^{(1)}$. Центром G_L является вершина x_0 для которой

$$s(x_0) = \min_{s_1=1,2,\dots,n} s(x_{s_1}^{(1)}).$$

Процедура α_0

ВХОД:	взвешенный структурно-динамический граф G_L .
ВЫХОД:	Вершина x_0 – центр G_L .
ШАГ 1	Для каждой вершины $x_{s_L}^{(L)}, s_L = 1, 2, \dots, n^{L-1}$ найти числа разделения $s(x_{s_L}^{(L)}) = \max_{j_L=1,2,\dots,n-1} d(x_{s_L}^{(L)}, v_{j_L}^{(L)})$, используя алгоритм Дейкстры, где $d(x_{s_L}^{(L)}, v_{j_L}^{(L)}) = 0$. Для $l = L-1, L-2, \dots, 2$ ВЫПОЛНИТЬ:
ШАГ $L-l+1$	Для вершины $x_{s_l}^{(l)}, s_l = 1, 2, \dots, n^{l-1}$ найти числа разделения $s(x_{s_l}^{(l)}) = \max_{j_l} d[(x_{s_l}^{(l)}, v_{j_l}^{(l)}) + s(x_{j_l}^{(l+1)})]$, где $d(x_{s_l}^{(l)}, v_{j_l}^{(l)}) = 0$. Для поиска кратчайших путей используется процедура Дейкстры.
ШАГ L	Для каждой вершины $x_{s_1}^{(1)}, s_1 = 1, 2, \dots, n$ найти числа разделения

$$s(x_{s_1}^{(1)}) = \max_{j_1=1,2,\dots,n-1} d\left[\left(x_{s_1}^{(1)}, v_{j_1}^{(1)}\right) + s\left(x_{j_1}^{(2)}\right)\right], \text{ где } d\left(x_{s_1}^{(1)}, v_{j_1}^{(1)}\right) = 0. \text{ Для}$$

поиска кратчайших путей используется процедура Дейкстры.

ШАГ $L+1$ Из всех $x_{s_1}^{(1)}, s_1 = 1, 2, \dots, n$, вершина x_0 для которой

$$s(x_0) = \min_{s_1=1,2,\dots,n} s(x_{s_1}^{(1)}) \text{ является центром } G_L.$$

Далее предлагается доказательство сходимости алгоритма к требуемому решению, а именно, размещению центра динамического графа G_L .

Теорема 1. Процедура α_0 выделяет центр G_L при условии сохранения смежности старых ребер.

Доказательство. Процедура α_0 выделяет центр на подграфе первого ранга в силу смежности старых ребер и ограничения на коэффициент подобия.

Если центром является вершина $v_1^{(L)}$ подграф-затравки L -го ранга, длина кратчайшего пути равна:

$$\begin{aligned} d(v_1^{(L)}, v_2^{(L)}) &= d(v_1^{(L)}, v^{(L-1)}) + d(v^{(L-1)}, v^{(L-2)}) + \dots \\ &\quad + d(v^{(2)}, v^{(1)}) + d(v^{(1)}, v^{(2)}) + \dots + d(v^{(L-2)}, v^{(L-1)}) + d(v^{(L-1)}, v_2^{(L)}). \end{aligned}$$

Длина кратчайшего пути от $v_1^{(L-1)}$ до $v_2^{(L)}$:

$$\begin{aligned} d(v_1^{(L-1)}, v_2^{(L)}) &= (n-1)\theta^{L-2}a + (n-1)\theta^{L-3}a + \dots + (n-1)\theta^1a + (n-1)\theta^0a + (n-1)\theta^1a + \dots \\ &\quad + (n-1)\theta^{L-3}a + (n-1)\theta^{L-2}a + (n-1)\theta^{L-1}a. \end{aligned}$$

Тогда $d(v_1^{(L-1)}, v_2^{(L)}) < d(v_1^{(L)}, v_2^{(L)})$.

Кратчайший путь от $v_1^{(L-1)}$ до $v_1^{(L)}$ равен $d(v_1^{(L-1)}, v_1^{(L)}) = (n-1)\theta^{L-1}b$, тогда

$d(v_1^{(L-1)}, v_2^{(L)}) < d(v_1^{(L)}, v_2^{(L)})$ и $d(v_1^{(L-1)}, v_1^{(L)}) < d(v_1^{(L)}, v_2^{(L)})$, и вершина L -го ранга не

может быть центром G_L . Где θ - коэффициент подобия, который изменяет веса при переходе от подграфов первого ранга к последующим, при этом значения весов ребер подграфа первого ранга лежат на отрезке $[a, b]$.

Рассматриваются вершины разных рангов в качестве центра графа до второго ранга включительно, но они не могут быть центрами графа G_L . Методом исключений в качестве центра определяется вершина первого ранга.

Следствие 1. Процедура α_0 выделяет центр $x_{i,0}, i = \overline{1, M}$, для каждого из набора из M весов графа G_L при сохранении смежности старых ребер.

Теорема 2. Вычислительная сложность α_0 равна $O(4n^2 \cdot N)$, где $4n^2$ – входной параметр-константа.

Доказательство. Для поиска кратчайшего пути с помощью алгоритма Дейкстры и выбора максимального элемента на одной подграф-затравке требуется выполнение $2n^2$ операций. Для обработки всех подграфов требуется выполнение операций:

$$\begin{aligned} 2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + \dots + 2n^3 + n^3 + n^2 &\leq 2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + \dots \\ \dots + 2n^3 + 2n^2 + n^3 &\leq 2 \frac{(n^{L+1}n - n^2)}{n-1} + n^3 \leq 2n^{L+2} - n^2 + n^3 \leq 2n^{L+2} + 2n^{L+2} = \\ &= 4n^2 \cdot n^L = 4n^2 \cdot N. \end{aligned}$$

Следствие 2. Вычислительная сложность α_0 поиска $i = \overline{1, M}$ центров $x_{i,0}$ равна $O(4n^2 \cdot N \cdot M)$.

Следствие 3. Вычислительная сложность α_0 меньше, чем у алгоритма Флойда-Уоршелла [21] в $\frac{1}{4}n^{L-2}$ раз.

Теорема 3. Процедура α_0 выделяет центр $x_{i,0}$ на G_L , оптимальный по $F_{2M+1}(x_{i,0})$ и $F_{2M+2}(x_{i,0})$, и со следующими оценками по остальным критериям

$$a \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1} \leq F_i(x_{i,0}) \leq b(n-1) \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1}, i = 1, 2, \dots, 2M.$$

Доказательство. В случае прохождения $(n-1)$ ребер число разделения оценивается

$$\begin{aligned} s(x_{i,0}) &\leq (n-1)b + (n-1)\theta b + \dots + (n-1)\theta^{L-1}b = \\ &= (n-1)b(1 + \theta + \theta^2 + \dots + \theta^{L-1}) = b(n-1) \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1}. \end{aligned}$$

В минимальном случае $s(x_{i,0}) \geq a + \theta a + \dots + \theta^{L-1}a = a \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1}$. Тогда критерии

$F_i(x_{i,0}), i = 1, 2, \dots, M$ оцениваются $a \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1} \leq F_i(x_{i,0}) \leq b(n-1) \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1}$. Так как кратный

центр содержит одну вершину, то радиус оценивается также как число разделения:

$$a \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1} \leq F_i(x_{i,0}) \leq b(n-1) \cdot \frac{\theta^L - 1}{\theta - 1}, i = M+1, M+2, \dots, 2M.$$

Число центров разного ранга равно единице: $F_{2M+1}(x_{i,0}) = 1$.

Число вершин кратного центра также равно: $F_{2M+2}(x_{i,0}) = 1$.

Сформулированные теоремы 1-3 показывают состоятельность процедуры, а вытекающие из них следствия свидетельствуют о низкой ресурсоемкости представленного алгоритма, которая значительно ниже известных алгоритмов поиска центров в связи со специальными свойствами иерархичности. В случае

фиксирования одного из входных параметров (n – входной параметр-константа) процедура ускоряется по сравнению с известными алгоритмами на порядок N .

Заключение

В настоящей работе предложен алгоритм, демонстрирующий принципиальную возможность совместного представления и анализа структурно-функциональной устойчивости и целостности ГСПД с целью синтеза рациональных количественных и качественных конфигураций функционирования ПРСМ в условиях воздействия дестабилизирующих факторов различной интенсивности.

Подробно описана операция поиска центра в форме процедуры, как наиболее нагруженная с вычислительной точки зрения. Доказана состоятельность процедуры в форме теоремы и рассчитана ее вычислительная сложность, которая значительно ниже известных алгоритмов поиска центров в связи со специальными свойствами иерархичности. В случае фиксирования одного из входных параметров (n – входной параметр-константа) процедура ускоряется по сравнению с известными алгоритмами на порядок N .

В дальнейших работах предполагается расширение постановки задачи для многокритериального случая на многовзвешенном графе, а также расширение описания операций алгоритма оценивания структурно-функциональной устойчивости и целостности ГСПД ПРСМ.

Список источников

1. Гусеница Я.Н., Донченко А.А., Ляскин А.С. Концепция поддержки принятия решений задач сопровождения жизненного цикла сложных технических систем // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. № 1. С. 31-38. DOI: [10.36724/2409-5419-2024-16-1-31-38](https://doi.org/10.36724/2409-5419-2024-16-1-31-38)
2. Соколова И.С., Тырсин А.Н. Использование энтропийно-вероятностного моделирования в задачах мониторинга и управления сложными системами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4. С. 35–39.
3. Дорожко И.В., Осипов Н.А. Методика синтеза оптимальных стратегий диагностирования автоматизированных систем управления сложными техническими объектами с использованием априорной информации // Труды СПИИРАН. 2012. №1 (20). С. 165–185.
4. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Общее в подходе к имитационному моделированию инфокоммуникационных и транспортных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 912–917. DOI: [10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917)
5. Охтилев М.Ю., Мустафин Н.Г., Миллер В.Е., Соколов Б.В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 11. С. 7–15.
6. Шайдулин З.Ф., Балдычев М.Т., Тимошенко А.В., Омельшин А.А. Проактивное управление составом и структурой системы пространственного мониторинга в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Научно-

- технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 6. С. 848–857. DOI: [10.17586/2226-1494-2021-21-6-848-857](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-848-857)
7. Новиков Д.А. Рациональная интеллектуализация МАС // Международная научно-практическая конференция «Теория активных систем-2011» (Москва, 14–16 ноября 2011): сборник трудов. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. Т.3. С. 233–238.
8. Дмитриев В.И., Звонарев В.В., Лисицын Ю.Е. Методика обоснования рациональных способов управления беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 112. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=116566>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16)
9. Тимошенко А.В., Тавалинский Д.А., Балдычев М.Т. Методика построения нижней границы критерия восстановления целевой функции сложного объекта мониторинга на основе перколяционного анализа его информационного пространства // Вооружение и экономика. 2022. № 4 (62). С. 58-69.
10. Казанцев А.М., Кныш М.В., Макаров М.К. Выбор рационального состава группы радиоинформационных сенсоров пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170345>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-15)
11. Кочкаров А.А., Салпагаров М.Б., Кочкаров Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой // Управление большими системами. 2007. № 17. С. 103-120.

12. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Петров С.В, Смирнова И.М., Тененбаум Л.А. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики). Исследования по теории структур. - М.: Наука, 1988. С. 5-76.
13. Прокофьев В.С., Малышев В.А. Нечеткие алгоритмы планирования распределения ресурсов системы управления военного назначения // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2008. № 3. С. 50-53.
14. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 337 с.
15. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735>
16. Ананьев А.В., Багдасарян А.С., Багдасарян С.А., Кащенко А.Г., Кащенко Г.А. Минимизация рисков несанкционированного доступа к информации в наземных и аэромобильных радиосетях критически важных объектов методами многокритериальной многопутевой маршрутизации // Труды Научно-исследовательского института радио. 2017. № 2. С. 2-6.
17. Кочкаров А.А., Салпагаров М.Б., Кочкаров Р.А. Моделирование разрушения сложных систем с ациклической структурой // Управление большими системами. 2007. № 17. С. 103-120.
18. Казанцев А.М., Шевцов В.А., Кочкаров Р.А., Тимошенко А.В., Поздышев В.Ю., Прокопчина С.В. Показатель структурной эффективности управления

информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 124-131.

19. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А. О планарности и других топологических свойствах фрактальных графов: препринт. - М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2003. № 83. - 18 с.

20. Ахо А.В., Хопкрофт Д.Э., Ульман Д.Д. Структуры данных и алгоритмы. - М.: Вильямс, 2007. - 400 с.

21. Кормен Т.Х., Лейзерсон Ч.И., Ривест Р.Л., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. - М.: Вильямс, 2006. - 1296 с.

References

1. Gusenitsa Ya.N., Donchenko A.A., Lyaskin A.S. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 31-38. DOI: [10.36724/2409-5419-2024-16-1-31-38](https://doi.org/10.36724/2409-5419-2024-16-1-31-38)

2. Sokolova I.S., Tyrsin A.N. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*, 2012, no. 4, pp. 35–39.

3. Dorozhko I.V., Osipov N.A. *Trudy SPIIRAN*, 2012, no. 1 (20), pp. 165–185.

4. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 912–917. DOI: [10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-5-912-917)

5. Okhtilev M.Yu., Mustafin N.G., Miller V.E., Sokolov B.V. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 7–15.
6. Shaidulin Z.F., Baldychev M.T., Timoshenko A.V., Omel'shin A.A. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2021, vol. 21, no. 6, pp. 848–857. DOI: [10.17586/2226-1494-2021-21-6-848-857](https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-848-857)
7. Novikov D.A. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Teoriya aktivnykh sistem-2011»: sbornik trudov. Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2011, vol. 3, pp. 233–238.
8. Dmitriev V.I., Zvonarev V.V., Lisitsyn Yu.E. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116566>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16)
9. Timoshenko A.V., Tavalinskii D.A., Baldychev M.T. *Vooruzhenie i ekonomika*, 2022, no. 4 (62), pp. 58-69.
10. Kazantsev A.M., Knysh M.V., Makarov M.K. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170345>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-15)
11. Kochkarov A.A., Salpagarov M.B., Kochkarov R.A. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2007, no. 17, pp. 103-120.
12. Aizerman M.A., Gusev L.A., Petrov S.V., Smirnova I.M., Tenenbaum L.A. *Dinamicheskii podkhod k analizu struktur, opisyyvaemykh grafami (osnovy grafodinamiki). Issledovaniya po teorii struktur* (A dynamic approach to the analysis of structures described by graphs (fundamentals of graphodynamics). Research on the theory of structures). Moscow, Nauka, 1988, pp. 5-76.

13. Prokof'ev B.C., Malyshev V.A. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*, 2008, no. 3, pp. 50-53.
14. Makarenko S.I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyakh prednamerennykh destabiliziruyushchikh vozdeistvii i vedeniya razvedki: monografiya* (Models of the communication system in conditions of deliberate destabilizing influences and intelligence: monograph), Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2020, 337 p.
15. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735>
16. Anan'ev A.V., Bagdasaryan A.S., Bagdasaryan S.A., Kashchenko A.G., Kashchenko G.A. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo instituta radio*, 2017, no. 2, pp. 2-6.
17. Kochkarov A.A., Salpagarov M.B., Kochkarov R.A. *Upravlenie bol'shimi sistemami*, 2007, no. 17, pp. 103-120.
18. Kazantsev A.M., Shevtsov V.A., Kochkarov R.A., Timoshenko A.V., Pozdyshev V.Yu., Prokopchina S.V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2024, vol. 20, no. 2, pp. 124-131.
19. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A. *O planarnosti i drugikh topologicheskikh svoistvakh fraktal'nykh grafov* (On Planarity and Other Fractal Graphs Topological Properties), Moscow, IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2003, no. 83, 18 p.
20. Akho A.V., Khopkroft D.E., Ul'man D.D. *Struktury dannykh i algoritmy* (Data structures and algorithms), Moscow, Vil'yams, 2007, 400 p.
21. Kormen T.Kh., Leizerson Ch.I., Rivest R.L., Shtain K. *Algoritmy: postroenie i analiz* (Algorithms: construction and analysis), Moscow, Vil'yams, 2006, 1296 p.

Статья поступила в редакцию 24.06.2024

Одобрена после рецензирования 04.07.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 24.06.2024; approved after reviewing on 04.07.2024;
accepted for publication on 28.08.2024