

УДК 004.896, 519.1

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.35.4.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.005)

## Некоторые подходы к оценке процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга в условиях внешних воздействий

А.М. Казанцев<sup>1</sup>✉, Р.А. Кочкаров<sup>2</sup>, А.В. Тимошенко<sup>1</sup>, А.А. Сычугов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт прикладной математики и компьютерных наук, Тула,  
Российская Федерация

[kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com)✉

**Резюме.** Несмотря на большое внимание, уделяемое в современных работах проблемам организации структурно-динамических систем мониторинга, остаются актуальными вопросы, связанные с обеспечением их надежного функционирования в случае внешних воздействий. В связи с этим, данная статья посвящена решению задачи оценки процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга, с точки зрения возможных изменений ее состава и структуры в условиях влияния внешних воздействий, отражающихся на выполнении системой своих функций с требуемыми характеристиками. Предложенный в работе подход к решению данной задачи основывается на теории графов и методах дискретной оптимизации, позволяющих представить процесс функционирования системы как две взаимосвязанные частные задачи: определение оптимального сочетания объект мониторинга – средство мониторинга и доведение информации до конечного потребителя. Для первой частной задачи рассмотрена многокритериальная задача покрытия двудольного динамического графа звездами и предложен алгоритм ее решения, а для второй – применение алгоритмов с оценками для построения приближенных решений. В качестве критерия для оценки верхних границ изменений характеристик системы, при которой она выполняет поставленные задачи в требуемом объеме, предложено использовать понятие радиуса устойчивости. На основе аналитического выражения радиуса устойчивости показано, как проводить оценки устойчивости оптимального, по заданным критериям, варианта состава и структуры структурно-динамической системы мониторинга к изменениям ее характеристик в результате внешних воздействий. Применение полученных результатов в существующих технологиях построения структурно-динамических систем мониторинга позволит повысить надежность и устойчивость функционирования подобных систем.

**Ключевые слова:** система мониторинга, динамический граф, покрытие графа, звезды, цепи, радиус устойчивости, многокритериальная оптимизация, структурная динамика, внешние воздействия.

**Для цитирования:** Казанцев А.М., Кочкаров Р.А., Тимошенко А.В., Сычугов А.А. Некоторые подходы к оценке процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга в условиях внешних воздействий. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1047> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.005

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-01107\19.

## Some approaches to assessing the process of functioning of structural-dynamic monitoring systems under external influences

A.M. Kazantsev<sup>1</sup>✉, R.A. Kochkarov<sup>2</sup>, A.V. Timoshenko<sup>1</sup>, A.A. Sychugov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Financial University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Applied Mathematics and Computer Science, Tula, Russian Federation

[kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com)✉

**Abstract:** Despite the great attention paid in modern works to the problems of organizing structural-dynamic monitoring systems, there are still topical issues related to ensuring their reliable functioning in the event of external influences. This article is to solve the problem of assessing the process of functioning of structural-dynamic monitoring systems from the point of view of possible changes in its composition and structure under conditions of external influences that affect the performance of the system's functions with the required characteristics. The proposed approach to this problem solution is based on the theory of graphs and discrete optimization methods. They make it possible to represent the process of the system's functioning as two interrelated subproblems: determining the optimal combination of the monitoring object-monitoring tool and bringing information to the end-user. A multicriteria problem of covering a bipartite dynamic graph with stars is considered, and an algorithm for its solution is proposed for the first problem. The application of algorithms with estimates to construct approximate solutions is introduced for the second. As a criterion for assessing the upper bounds of changes in the system characteristics, at which it performs the assigned tasks in the required volume, it is suggested to use the concept of the radius of stability. Based on the analytical expression of the stability radius, it is shown how to assess the stability of the optimal, according to the given criteria, variant of the composition and morphology of the structural-dynamic monitoring system to changes in its characteristics as a result of external influences. The results application obtained in existing technologies for constructing structural-dynamic monitoring systems will increase the reliability and stability of the functioning of such systems.

**Keywords:** monitoring system, dynamic graph, graph coverage, stars, chains, stability radius, multicriteria optimization, structural dynamics, external influences.

**For citation:** Kazantsev A.M., Kochkarov R.A., Timoshenko A.V., Sychugov A.A. Some approaches to assessing the process of functioning of structural-dynamic monitoring systems under external influences. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1047> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.005 (In Russ).

**Acknowledgments:** The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 19-07-01107\19.

### Введение

Вопросы оперативного и надежного сбора информации системами мониторинга при решении различных прикладных задач не теряют своей актуальности несмотря на постоянные работы в данном направлении [1-3]. Активно разрабатываются новые структуры таких систем и технологии сбора и передачи данных. В частности, совместное использование стационарных и подвижных (или исключительно подвижных) сенсоров позволяет создавать системы мониторинга, устойчивые как к внешним воздействиям (ВВ) [4-6], так и к условиям сбора и передачи данных.

В настоящей статье рассматриваются современные системы мониторинга, которые представляют собой объединенные в единую структуру подвижные и

малоподвижные (стационарные) средства мониторинга (СМ) наземного и воздушного базирования, обеспечивающие решение поставленных задач за счет поддержания характеристик системы на заданном уровне [7,8]. Основными задачами таких систем являются оперативное и высокоточное обнаружение требуемых объектов и своевременное доведение информации о них до конечного пользователя в условиях ВВ.

По сути, система мониторинга представляет собой структурно-динамическую сеть, поэтому адекватная модель, учитывающая как изменение ее структуры, так и изменения характеристик отдельных ее элементов вследствие ВВ, является необходимым инструментом для функционирования системы с требуемым уровнем характеристик. Основой такой модели является формализованное описание состава и структуры системы мониторинга, т. е. ее конфигурации, в качестве параметров которой могут выступать как средства и объекты мониторинга, конечные пользователи, так и структура сети, и информационные каналы. При этом изменение любого из этих параметров приводит к изменению конфигурации системы и ее характеристик соответственно.

С целью оперативного контроля влияния изменений конфигурации системы вследствие ВВ на процесс ее функционирования, авторами статьи предложен подход, основанный на комплексном использовании теории динамических графов и методов векторной дискретной оптимизации

### Методы и материалы

В настоящее время ведутся исследования систем сбора и анализа данных, которые так или иначе могут быть отнесены к структурно-динамическим системам мониторинга. В частности, в работе [9] исследуются гетерогенные беспроводные сенсорные сети, используемые для взаимодействия с беспилотными летательными аппаратами и включающие в себя как стационарные, так и подвижные сенсоры. По результатам проведенных исследований был разработан протокол маршрутизации.

В работах [10-12] приведен обзор последних достижений в области интегрирования беспроводных сенсорных сетей и беспилотных летательных аппаратов, проведена сравнительная оценка множества теоретических и прикладных работ, а также изучена возможность применения данной технологии, в частности, для улучшения сбора полевой информации в агропромышленных задачах.

Несмотря на большое внимание, уделяемое в современных работах вопросам организации подобных систем и технологиям передачи данных, практически не рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением надежного функционирования структурно-динамической системы мониторинга в случае ВВ в условиях высокой динамики взаимодействия между средствами мониторинга и конечными потребителями. Решению этих вопросов посвящена данная статья.

При моделировании структурно-динамической системы мониторинга будем учитывать следующие факторы, согласно [7]:

- объекты мониторинга, наземные и воздушные СМ мобильны и способны выполнять различные маневры;
- СМ наземного и воздушного базирования оснащены аппаратно-программными комплексами группового управления;
- СМ наземного и воздушного базирования в зоне своей ответственности обеспечивают решение поставленных перед системой задач за счет формирования требуемых значений характеристик.

Будем считать, что система выполняет поставленные задачи за счет оперативного обнаружения объектов при помощи СМ и своевременной доставки информации о них конечным пользователям. В качестве потребителей могут быть задействованы как отдельные СМ, так и пункты управления самой системы. В зависимости от текущей обстановки конфигурация системы может быть разной, что создает дополнительные трудности для обеспечения характеристик всей системы.

Проведенный анализ показал, что в качестве основного математического аппарата для моделирования структурно-динамической системы мониторинга целесообразно использовать методы и теорию динамических графов [13, 14]. При этом достижение требуемого уровня характеристик обеспечивается оптимальной конфигурацией системы за счет последовательного решения двух взаимосвязанных частных задач. Во-первых, построением оптимального паросочетания объект мониторинга – СМ, во-вторых – оптимальным доведением информации. Схема решения задачи представлена на Рисунке 1.

Для первой частной задачи рассмотрим статический граф  $G_l = (V_{l1}, V_{l2}, E_l)$ , являющийся частью динамического графа  $G$  вследствие подвижности СМ и объектов мониторинга в зоне ответственности системы (Рисунок 2). Множество вершин  $V_{l1} = \{v_i\} \subseteq V_l$  графа будут соответствовать определенному набору СМ системы, а множество вершин  $V_{l2} = \{q_j\} \subseteq V_l$  – набору объектов мониторинга. При этом ребра  $E_l = \{e\}$  характеризуют факт присутствия объекта  $q_j$  в зоне ответственности средства  $v_i$  за счет весов  $w(e)$ , определяемых признаками  $x_i = \{x_{ij}\}$  объектов  $q_j$  (например, информационными). Вершинам  $V_{l1} = \{v_i\} \subseteq V_l$ , в свою очередь, поставим в соответствие такую характеристику  $H$ , как вероятность обнаружения объектов в заданном пространстве, которая будет зависеть от значений признаков  $x_i$ :

$$H_j = F[x_g(q_{j_1}), \dots, x_g(q_{j_k})], \quad (1)$$

где  $H_j$  – вероятность обнаружения  $j$ -го объекта мониторинга,  $x_g(q_{j_k})$  – значение  $g$ -го признака, воздействующего на  $H_j$  и относящегося к объекту  $q_{j_k}$ .

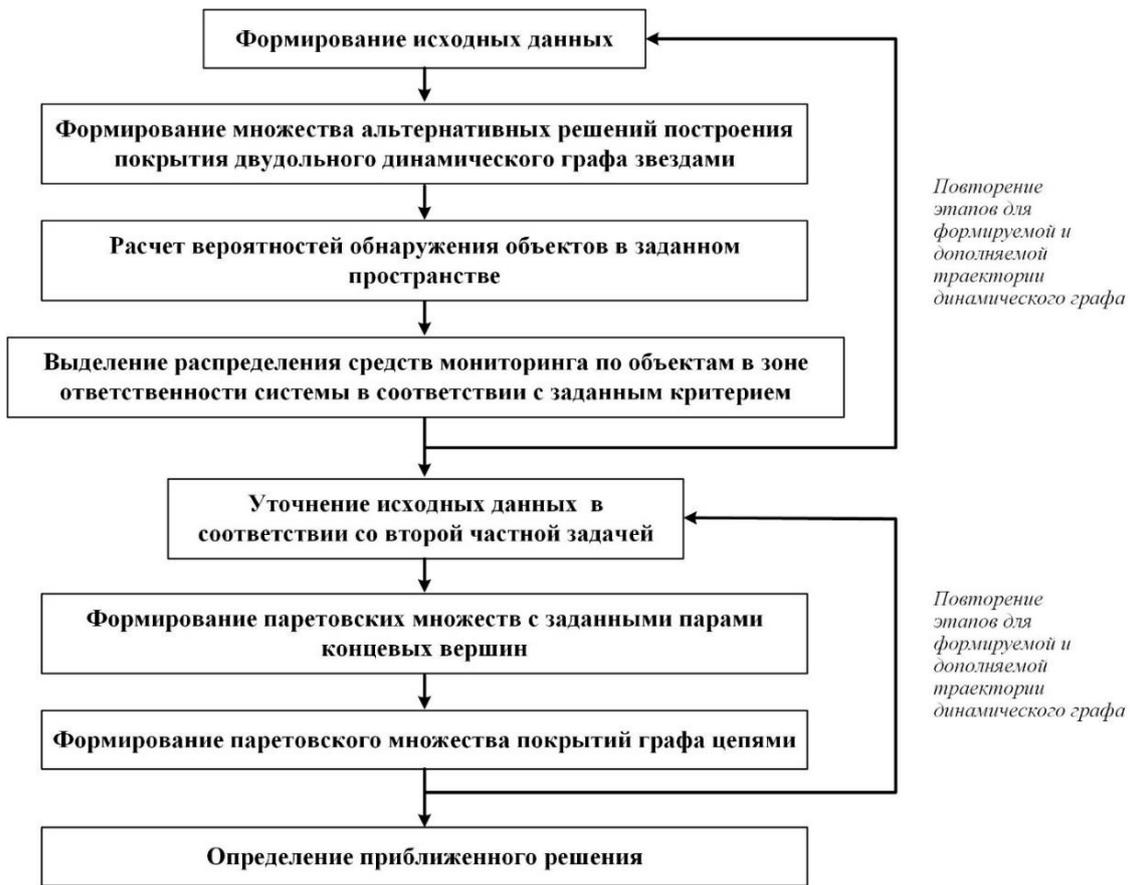


Рисунок 1 – Схема решения задачи мониторинга  
Figure 1 – Monitoring problem solution scheme

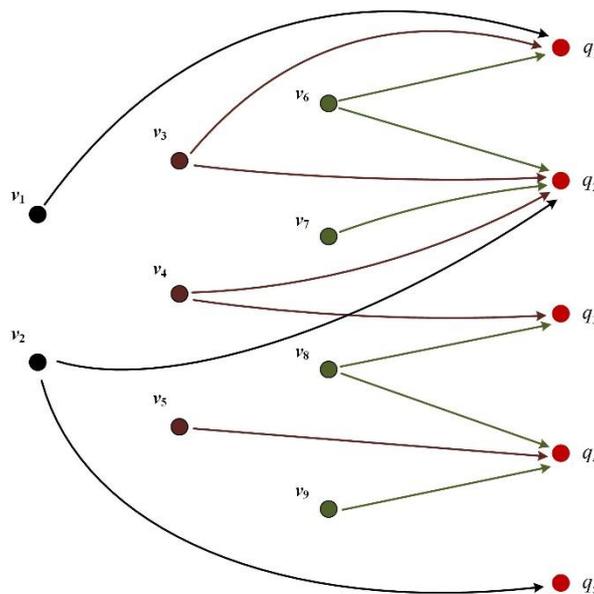


Рисунок 2 – Граф распределения средств мониторинга по объектам  
Figure 2 – Graph of distribution of monitoring tools by objects

Как показано в [7] объекты  $V_{l2}$ , находящиеся в зоне ответственности системы формируют на динамическом графе множество динамических подграфов-звезд  $\{Z^{q_j}\}$  с центром в вершине  $q_j$ .

Для определения оптимального паросочетания объект мониторинга – СМ необходимо сформулировать многокритериальную задачу покрытия двудольного динамического графа звездами:

$$F(y) = (F_1(y_{G_l}), F_2(y_{G_l}), F_3(y_{G_l})) \quad (2)$$

$$y_{G_l} = \cup_i Z_l^{q_j} = (V_{G_l}, E_{G_l}) \quad (3)$$

с частными критериями

$$F_1(y_{G_l}) = |E_{G_l}| \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $|E_{G_l}|$  – количество ребер покрытия  $y_{G_l}$ ;

$$F_2(y_{G_l}) = |E_{Z_l^{q_j}}| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $|E_{Z_l^{q_j}}|$  – количество ребер подграфа-звезды  $Z_l^{q_j}$  с центром в вершине  $q_j$ , в предлагаемой постановке  $|E_{Z_l^{q_j}}| \geq 2$ ;

$$F_3(y_{G_l}) = R(x_j^*, x_j^{y_{G_l}}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $x_j^*$  – вектор значений признаков, гарантирующих обнаружение  $j$ -го объекта, а  $x_j^{y_{G_l}}$  – веса ребер подграфа-покрытия  $y_{G_l}$ , соответствующие текущему вектору значений признаков объекта мониторинга, формируемых средствами системы в момент времени  $l$ ;  $R$  – расстояние между двумя множествами.

Решение (2)-(6) предполагает этапность.

Этап 1. Формирование исходных данных:

–зон ответственности отдельных СМ системы  $v_i$ , обеспечивающих покрытие всей зоны ответственности системы, с учетом возможных траекторий движения объектов мониторинга  $q_j$ ;

–двудольного динамического графа  $G = (V_1, V_2, E)$  при  $V_1 = \{v_i\} \subseteq V_{l1}$  и  $V_2 = \{q_j\} \subseteq V_{l2}$  в соответствии с возможными траекториями движения объектов в зоне ответственности системы;

–весов  $w(e)$  ребер  $E_l = \{e\}$  статических графов  $G_l = (V_{l1}, V_{l2}, E_l)$  в соответствии со значениями признаков  $x_i$  на всей траектории  $l = 1, 2, \dots, L$  динамического графа  $G$ ;

–размерности траектории  $L$ .

Этап 2. Формирование множества альтернативных решений.

Формирование постановки многокритериальной задачи построения покрытия двудольного динамического графа  $G$  звездами  $\{Z^{q_j}\}$  с траекториями  $Z_l^{q_j}, l = 1, 2, \dots, L$  с учетом размерности траектории при  $|E_{Z_l^{q_j}}| \geq 2$ . Для решения может быть использован алгоритм Хопкрофта-Карпа [15] и аппарат, предложенный в [16].

Этап 3. Расчет вероятностей обнаружения объектов в заданном пространстве.

Этап 4. Выделение распределения СМ по объектам  $\{\bar{Z}_l^{qj} = (V_{\bar{Z}_l^{qj}}, V_{l2}, E_{\bar{Z}_l^{qj}})\}$  в зоне ответственности системы в соответствии с критерием  $\max H(\tilde{y})$ . Множество вершин  $V_{\bar{Z}_l^{qj}}$  соответствует оптимальному набору СМ системы.

Этап 5. Повторение этапов 1, 2 и 3 для формируемой и дополняемой траектории  $G_l$  для  $l, l+1, l+2, \dots$  динамического графа  $G$ .

Вычислительная сложность всякого алгоритма измеряется количеством элементарных операций (арифметических, сравнения и т. п.), обозначим ее через  $\tau(\alpha)$  и оценим сложность предложенного алгоритма. Трудоемкость построения двудольного графа составляет  $O(Nn^2)$ , трудоемкость алгоритма Хопкрофта-Карпа составляет  $O(n^{5/2})$ , откуда  $\tau(\alpha) = O(Nn^2 + n^{5/2})$ ; сложность вычисления весов ребер графа  $G_l$  составляет  $O(Nn^2)$ , нахождение решения составляет  $O(n^3)$ , откуда  $\tau(\alpha) = O(Nn^2 + n^3)$ . Таким образом,  $\tau(\alpha) = O(Nn^2 + n^3)$ .

Во второй частной задаче – оптимального доведения информации, рассмотрим статический граф  $G_l = (V_l, E_l)$  из траектории динамического графа  $G$ , множество вершин  $V_l^* = \{v_i^*\} \subseteq V_l$  которого соответствует определенному набору СМ системы, а множество вершин  $U_l^* = \{u_j^*\} \subseteq V_l$  – конечным потребителям. Ребра  $E_l = \{e\}$  соответствуют множеству каналов взаимодействия между СМ в текущий момент времени  $l$  и взвешены характеристикой  $w(e)$ , характеризующей, например, время доведения информации по выделенному информационному каналу.

При такой формализации покрытие  $x_{G_l} = (V_x, E_x), V_x \subseteq V_l, E_x \subseteq E_l$  [16], представляющее собой множества простых  $k$ -цепей  $C = \{c_1^{11}, c_1^{12}, \dots, c_k^{ij}, \dots\}$  с концевыми вершинами из множеств  $V_l^*$  и  $U_l^*$  соответствует всевозможным вариантам доведения информации между СМ и конечными потребителями. В качестве векторно-целевой функции на множестве покрытий  $x_{G_l} \in X_{G_l}$  графа  $G_l$  определим:

$$F(x) = (F_4(x_{G_l}), F_5(x_{G_l})) \quad (7)$$

с частными критериями:

1. Количественный критерий, характеризующий время доведения информации конкретной конфигурации системы непрерывного мониторинга

$$F_4(x_{G_l}) = \sum_{c_k^{ij} \in C} T(c_k^{ij}) \rightarrow \min. \quad (8)$$

2. Критерий, отражающий топологию структуры конфигурации системы

$$F_5(x_{G_l}) = |c_k^{ij}| \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $|c_k^{ij}|$  – количество вершин в цепи  $c_k^{ij}$ .

Покрытия  $\{x_{G_l}\}$  графа  $G_l$  образуют множество допустимых решений  $X_{G_l} = X(G_l) = \{x_{G_l}\}$  для ВЦФ (6)-(8). Однако, в парето-оптимальном множестве  $\tilde{X}_{G_l}$ , при  $|\tilde{X}_{G_l}| \geq 2$ , в соответствии с теорией многокритериальной оптимизации, не существует единственного решения  $x_{G_l} \in \tilde{X}_{G_l}$  одновременно оптимального для всех частных

критериев задачи (7). Поэтому их сочетание критериев приводит к необходимости применения алгоритмов с оценками для построения приближенных решений.

Этап 1. Формирование исходных данных:

– статического графа  $G_l = (V_l, E_l)$  при  $V_l^* = \{v_i^*\} \subseteq V_l$  и  $U_l^* = \{u_j^*\} \subseteq V_l$  из траектории  $G_1, G_2, \dots, G_l, \dots, G_L, \dots$  динамического графа  $G$  в соответствии с возможными вариантам доведения информации в системе;

– весов  $w(e)$  ребер  $E_l = \{e\}$  статических графов  $G_l = (V_l, E_l)$  в соответствии со значениями времени доведения информации  $T$  по выделенным информационным каналам на всей траектории  $l = 1, 2, \dots, L, \dots$  динамического графа  $G$  ;

– размерности траектории  $L$ .

Этап 2. Формирование паретовских множеств  $\tilde{X}_{ij}$  с заданными парами конечных вершин  $v_i^*$  и  $u_j^*$ .

Этап 3. Формирование паретовского множества  $\tilde{X}_{G_l} = \bigcup_{\substack{1 \leq i \leq |V_l^*| \\ 1 \leq j \leq |U_l^*|}} \tilde{X}_{ij}$  покрытий графа

$G_l = (V_l, E_l)$  цепями  $C = \{c_1^{11}, c_1^{12}, \dots, c_k^{ij}, \dots\}$ .

Этап 4. Определение приближенного решения.

Приближенным решением является любое подмножество  $X_{G_l}^* \subset X_{G_l}$ , для которого не имеет место включение  $F(\tilde{X}_{G_l}) \subseteq F(X_{G_l}^*)$  (или  $F(X_{G_l}^* \cap \tilde{X}_{G_l}) = F(\tilde{X}_{G_l})$ ).

Относительное отклонение приближенного решения  $X_{G_l}^*$  от искомого оценивается вектором  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ , верхняя оценка  $\bar{\varepsilon}$  которого для рассматриваемого типа задачи равна:

$$\bar{\varepsilon}_k = \min_{x \in X_{G_l}^*} \frac{F_k(x) - a_k}{a_k}, a_k = \min_{x \in X_{G_l}} F_k(x), k = 1, 2 \quad (10)$$

Этап 5. Повторение этапов 1, 2 и 3 для формируемой и дополняемой траектории  $G_l = (V_l, E_l)$  для  $l, l+1, l+2, \dots$  динамического графа  $G$ .

В результате, процесс функционирования системы сводится к определению ее оптимальной конфигурации за счет решения задач определения оптимального паросочетания и покрытия (выделения подграфа) цепями на динамическом графе. Однако, в процессе функционирования оптимальная конфигурация системы может измениться вследствие подвижности СМ, изменения потребителей информации, или же выходом из строя СМ или средств связи в связи с влиянием ВВ. Таким образом, можно полагать, что такие изменения влияют на уже найденную оптимальную конфигурацию системы.

Основными параметрами для задачи оценки функционирования структурно-динамических систем мониторинга, формализованных в виде многокритериальных задач (2)-(6) и (7)-(9) на динамическом графе, являются веса ребер графа. Воздействие ВВ на систему приводит к изменению весов ребер графа, в результате чего возникает необходимость оценки устойчивости уже найденной оптимальной конфигурации системы.

Для оценки устойчивости задач дискретной оптимизации известен такой количественный критерий, как радиус устойчивости [17]. В рамках рассматриваемой задачи применение радиуса устойчивости реализуемого оптимального решения по

организации взаимодействия СМ позволяет определить верхнюю границу допустимых изменений характеристик системы, при которой она выполняет поставленные задачи в требуемом объеме.

Формула расчета радиуса устойчивости в общем виде обоснована в ряде работ [18-20]. Применительно к рассматриваемой задаче было получено следующее выражение для радиуса устойчивости в отношении реализуемого решения. Обозначим  $\rho$  радиус устойчивости реализуемого решения, тогда для оптимального паросочетания объект мониторинга – СМ:

$$\rho(\tilde{y}_{G_l}^*) = \frac{\min_{y \in y_{G_l}/\tilde{y}_{G_l}} |F_3(\tilde{y}_{G_l}^*) - F_3(y)|}{\max_{y \in y_{G_l}/\tilde{y}_{G_l}} F_3(y)}; \quad (11)$$

для доведения информации в оптимальной конфигурации пространственно-распределенной системы мониторинга:

$$\rho(\tilde{x}_{G_l}^*) = \frac{\min_{x \in x_{G_l}/\tilde{x}_{G_l}} |F_4(\tilde{x}_{G_l}^*) - F_4(x)|}{\max_{x \in x_{G_l}/\tilde{x}_{G_l}} F_4(x)} \quad (12)$$

Зная значение радиуса устойчивости, можно проводить оценки устойчивости данного (оптимального) варианта конфигурации структурно-динамической системы мониторинга к изменениям ее характеристик в результате ВВ. В частности, в соответствии с [18-20] вариант конфигурации системы является устойчивым, если для любой матрицы возмущений  $B$ , сформированной на основе значений ВВ, влияющих на граф  $G_l$ , такой что

$$\|B\| < \varepsilon, \quad (13)$$

где  $\|\cdot\|$  – норма матрицы  $B$ ,  $\varepsilon$  – в общем случае число, определяемое на основе оценки экспертов или по результатам моделирования (в рамках рассматриваемой задачи целесообразно полагать  $\varepsilon = \rho(\tilde{x}_{G_l}^*)$ );

выполняется условие:

$$\varphi(A + B) \subseteq \varphi(A), \quad (14)$$

где  $A$  – матрица смежности графа  $G_l$ ,  $\varphi(A)$  – совокупность номеров цепей, которые являются решениями задачи нахождения оптимального варианта конфигурации системы в графе  $G_l$ .

Таким образом, зная вычисленный радиус устойчивости оптимального варианта конфигурации системы и значение нормы матрицы возмущений, становится возможным оценить влияние ВВ на структуру системы мониторинга: приведет ли изменение характеристик системы к невыполнению поставленной перед ней задачи.

### Заключение

Высокая динамика как в процессах взаимодействия, так и структуры взаимодействий между средствами мониторинга и конечными пользователями, а также ВВ, является принципиальной особенностью современных пространственно-распределенных систем мониторинга с подвижными средствами мониторинга. Именно эта особенность приводит к необходимости оценки изменений конфигурации системы с целью обеспечения требуемых значений ее характеристик.

В настоящей работе предложен подход, основанный на интегрированном использовании теории динамических графов и методов векторной дискретной оптимизации. Методы теории динамических графов позволили дать строгое описание изменений в структуре связей СМ системы, а методы векторной дискретной оптимизации позволили оценить устойчивость найденных решений взаимодействия СМ с учетом возможных ВВ.

Первым важным результатом данной работы является решение задачи определения оптимального паросочетания объект мониторинга – СМ, полученное на основе решения многокритериальной задачи покрытия двудольного динамического графа звездами.

Вторым важным результатом исследования является то, что полученные математические зависимости, в частности, для расчета значения радиуса устойчивости, позволяют определить диапазоны воздействий различных ВВ, в пределах которых структурно-динамические системы мониторинга обеспечивают выполнение поставленных перед ними задач.

Для предложенных практико-ориентированных постановок многокритериальных задач (покрытие двудольного динамического графа звездами, построение покрытия динамического графа цепями с заданными концевыми вершинами) разработаны алгоритмы их решений, в том числе позволяющие учесть отклонение решений от оптимального в случае оптимальности только некоторых из определенных критериев.

Применение полученных результатов в существующих технологиях функционирования структурно-динамических систем мониторинга позволит повысить надежность и устойчивость функционирования подобных систем.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Carminati M., Kanoun O., Ullo S.L., Marcuccio S. Prospects of Distributed Wireless Sensor Networks for Urban Environmental Monitoring. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2019;34(6):44–52. DOI: 10.1109/MAES.2019.2916294.
2. Zhang S., Wang H., He S., Zhang C., Liu J. An Autonomous Air-Ground Cooperative Field Surveillance System with Quadrotor UAV and Unmanned ATV Robots. *IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. 2018:1527–1532. DOI: 10.1109/CYBER.2018.8688331
3. Popescu D., Vlasceanu E., Dima M., Stoican F., Ichim L. Hybrid Sensor Network for Monitoring Environmental Parameters. *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2020:933-938. DOI: 10.1109/MED48518.2020.9183165.
4. Андреева О.Н., Курнасова Е.В. Нечеткая когнитивная модель для идентификации и анализа дестабилизирующих факторов и техногенных ситуаций. *Вестник машиностроения*. 2019;2:81–88.
5. Dmitriev O.N., Novikov S.V. Preventing Faults in Machine Tools for Critical Cooperative and Distributed Industrial Productions. *Russ. Engin. Res.* 2019;39:55–59. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010027>
6. Evdokimenkov V.N., Kim R.V., Popov S.S. Risk Management by Trend Analysis of Flight Information. *Russ. Engin. Res.* 2020;40:160–163. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X20020136>
7. Кочкаров А.А., Рахманов А.А., Тимошенко А.В., Пулято С.А. Структурно-пространственная модель распределения средств системы мониторинга

- специального назначения по объектам наблюдения. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2020;13:124–132.
8. Верба В.С., Меркулов В.И., Чернов В.С. Особенности построения многопозиционных систем радиопреуправления воздушного базирования при скрытном наведении летательных аппаратов. *Радиотехника*. 2019;83(5-1):62–71.
  9. Erman A.T., Hoesel L.V., Havinga P., Wu J. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with UAVs for mission-critical management. *IEEE Wireless Communications*. 2008;15(6):38–46. DOI: 10.1109/MWC.2008.4749746.
  10. Popescu D, Stoican F, Stamatescu G, Chenaru O, Ichim L. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors*. 2019;19(21):4690. <https://doi.org/10.3390/s19214690>
  11. Zhang Y., Chen D., Wang S., Tian L. A promising trend for field information collection: An air-ground multi-sensor monitoring system. *Information Processing in Agriculture*. 2018;5(2):224–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.02.002>
  12. Zhang F., Wang G., Hu Y., Chen L., Zhu AX. Design of an Integrated Remote and Ground Sensing Monitor System for Assessing Farmland Quality. *Sensors*. 2020;20(2):336. DOI:10.3390/s20020336
  13. Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А., Малинецкий Г.Г. Некоторые аспекты динамической теории графов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2015;55(9):1623–1629. DOI 10.7868/S0044466915090094.
  14. Narary F., Gupta G. Dynamic Graph Models. *Mathl. Comput. Modelling*. 1997;25(7):79–87.
  15. Korte V., Vygen J. *Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag; 2002.
  16. Тебуева Ф.Б. *Многокритериальная задача покрытия графа звездами и ее приложение*. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ; 2007. 128 с.
  17. Гордеев Э.Н., Леонтьев В.К. Общий подход к исследованию устойчивости решений в задачах дискретной оптимизации. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1996;36(1):66–72.
  18. Кузьмин К.Г. Единый подход к нахождению радиусов устойчивости в многокритериальной задаче о максимальном разрезе графа. *Дискретный анализ и исследование операций*. 2015;22(5):30–51.
  19. Емеличев В.А., Бердышева Р.А. О радиусе устойчивости лексикографического оптимума векторной траекторной задачи. *Вестн. Белорус. Университета. Серия I*. 1998;1:43–46.
  20. Емеличев В.А., Кузьмин К.Г. Оценки радиуса устойчивости векторной задачи о максимальном разрезе графа. *Дискрет. математика*. 2013;25(2):5–12.

## REFERENCES

1. Carminati M., Kanoun O., Ullo S.L., Marcuccio S. Prospects of Distributed Wireless Sensor Networks for Urban Environmental Monitoring. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2019;34(6):44–52. DOI: 10.1109/MAES.2019.2916294.
2. Zhang S., Wang H., He S., Zhang C., Liu J. An Autonomous Air-Ground Cooperative Field Surveillance System with Quadrotor UAV and Unmanned ATV Robots. *IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. 2018;1527–1532. DOI: 10.1109/CYBER.2018.8688331

3. Popescu D., Vlasceanu E., Dima M., Stoican F., Ichim L. Hybrid Sensor Network for Monitoring Environmental Parameters. *28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2020;933–938. DOI: 10.1109/MED48518.2020.9183165.
4. Andreyeva O.N., Kurnasova Ye.V. Nechetkaya kognitivnaya model' dlya identifikatsii i analiza destabiliziruyushchikh faktorov i tekhnogennykh situatsiy. *Vestnik mashinostroyeniya = Russ. Engin. Res.* 2019;39:399–406. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19050034> (In Russ.)
5. Dmitriev O.N., Novikov S.V. Preventing Faults in Machine Tools for Critical Cooperative and Distributed Industrial Productions. *Russ. Engin. Res.* 2019;39:55–59. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19010027>
6. Evdokimenkov V.N., Kim R.V., Popov S.S. Risk Management by Trend Analysis of Flight Information *Russ. Engin. Res.* 2020;40:160–163. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X20020136>
7. Kochkarov A.A., Rakhmanov A.A., Timoshenko A.V., Putyato S.A. Strukturno-prostranstvennaya model' raspredeleniya sredstv sistemy monitoringa spetsial'nogo naznacheniya po ob'yektam nablyudeniya. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika = Aerospace forces. Theory and practice.* 2020;13:124–132. (In Russ.)
8. Verba V.S., Merkulov V.I., Chernov V.S. Features of the construction of multi-position air-based radio control systems for covert guidance of aircraft. *Radio Engineering.* 2019;83(5-1):62–71. (In Russ.)
9. Erman A.T., Hoesel L.V., Havinga P., Wu J. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with UAVs for mission-critical management. *IEEE Wireless Communications.* 2008;15(6):38–46. DOI: 10.1109/MWC.2008.4749746.
10. Popescu D, Stoican F, Stamatescu G, Chenaru O, Ichim L. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors.* 2019;19(21):4690. <https://doi.org/10.3390/s19214690>
11. Zhang Y., Chen D., Wang S., Tian L. A promising trend for field information collection: An air-ground multi-sensor monitoring system. *Information Processing in Agriculture.* 2018;5(2):224–233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.02.002>
12. Zhang F., Wang G., Hu Y., Chen L., Zhu AX. Design of an Integrated Remote and Ground Sensing Monitor System for Assessing Farmland Quality. *Sensors.* 2020;20(2):336. DOI:10.3390/s20020336
13. Kochkarov A.A., Kochkarov R.A., Malinetskii G.G. Issues of dynamic graph theory. *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2015;55(9): 1623–1629. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0044466915090094> (In Russ.)
14. Harary F., Gupta G. Dynamic Graph Models. *Mathl. Comput. Modelling.* 1997;25(7):79–87.
15. Korte B., Vygen J. *Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms.* Berlin: Springer-Verlag; 2002.
16. Tebuyeva F.B. Mnogokriterial'naya zadacha pokrytiya grafa zvezdami i yeye prilozheniye. Rostov-na-Donu: Izdatel'stvo YUFU; 2007:128. (In Russ.)
17. Gordeyev E.N., Leont'yev V.K. Obshchiy podkhod k issledovaniyu ustoychivosti resheniy v zadachakh diskretnoy optimizatsii. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1996;36(1):66–72. (In Russ.)

18. Kuz'min K.G. Yedinyy podkhod k nakhozhdeniyu radiusov ustoychivosti v mnogokriterial'noy zadache o maksimal'nom razreze grafa. *Diskretnyy analiz i issledovaniye operatsiy = Discrete analysis and operations research*. 2015;22(5):30–51. (In Russ.)
19. Yemelichev V.A., Berdysheva R.A. O radiuse ustoychivosti leksikograficheskogo optimuma vektornoy trayektornoy zadachi. *Vestn. Belorus. Universiteta. Seriya 1 = Bulletin of Belarusian University. Series 1*. 1998;1:43–46. (In Russ.)
20. Yemelichev V.A., Kuz'min K.G. Otsenki radiusa ustoychivosti vektornoy zadachi o maksimal'nom razreze grafa. *Diskret. matematika = Discrete mathematics*. 2013;25(2):5–12. (In Russ.)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Казанцев Андрей Михайлович**, кандидат технических наук, ведущий инженер Радиотехнического института имени А.Л. Минца, Москва, Российская Федерация  
*email: [kazantsev.andrei@gmail.com](mailto:kazantsev.andrei@gmail.com)*  
ORCID: [0000-0003-3608-8238](https://orcid.org/0000-0003-3608-8238)

**Andrey Mikhailovich Kazantsev**, candidate of technical sciences, Lead Engineer of Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russian Federation

**Кочкаров Расул Ахматович**, кандидат экономических наук, доцент, доцент Департамента анализа данных и машинного обучения Финансового университета при Правительстве Российской Федерации  
*email: [rasul\\_kochkarov@mail.ru](mailto:rasul_kochkarov@mail.ru)*  
ORCID: [0000-0003-3186-3901](https://orcid.org/0000-0003-3186-3901)

**Rasul Akhmatovich Kochkarov**, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of Department of Data Analysis and AI of Finance University under the Government of the Russian Federation

**Тимошенко Александр Васильевич**, доктор технических наук, профессор, начальник комплексного отдела, заместитель генерального Радиотехнического института имени А.Л. Минца, Москва, Российская Федерация  
*email: [u567ku78@gmail.com](mailto:u567ku78@gmail.com)*  
ORCID: [0000-0002-9791-142X](https://orcid.org/0000-0002-9791-142X)

**Alexander Vasilyevich Timoshenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Complex Department - Deputy General Designer of Academician A.L. Mints Radiotechnical Institute, Moscow, Russian Federation

**Сычугов Алексей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент, директор института прикладной математики и компьютерных наук Тульского государственного университета, Тула, Российская Федерация  
*email: [xru2003@list.ru](mailto:xru2003@list.ru)*  
ORCID: [0000-0002-3959-6994](https://orcid.org/0000-0002-3959-6994)

**Aleksei Alekseevich Sychugov**, candidate of technical sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Applied Mathematics and Computer Science of Tula State University, Tula, Russian Federation

*Статья поступила в редакцию 15.09.2021; одобрена после рецензирования 04.10.2021; принята к публикации 03.11.2021.*

*The article was submitted 15.09.2021; approved after reviewing 04.10.2021; accepted for publication 03.11.2021.*