

УДК 004.056

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-489-498

Оптимизация передачи сообщений в сетевых информационных системах

Сумин В.И., Лукин М.А.

Воронежский институт ФСИН России,
Россия, 394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1а
E-mail: viktorsumin51@yandex.ru, lykinma@mail.ru

Аннотация. В статье для сетевой информационной системы анализировалась маршрутизация сообщений с использованием ориентированного графа, для которого в соответствии с задаваемыми требованиями и ограничениями определялось множество двухсторонних связей для каждой пары узлов конечных через узлы транзитные. Процесс формализации передачи сообщений в сетевых информационных системах осуществляется с использованием теории графов с задаваемыми требованиями и ограничениями. В данной статье используется группа ограничений, которая включает структуру и длину маршрута. На основании предложенного метода определяется связь количество и длины маршрутов в зависимости от степени связности графа этой сети. В статье приведена лемма, на основе которой определяется множество всех маршрутов передачи сообщений в соответствии с задаваемыми ограничениями маршрутов передачи сообщений.

Ключевые слова: сетевые информационные системы, неориентированный граф, орграф, приоритеты передачи сообщений, взвешенный ориентированный граф, целочисленная весовая функция, образ вершины на графе, связанность графа

Для цитирования: Сумин В.И., Лукин М.А. 2024. Оптимизация передачи сообщений в сетевых информационных системах. Экономика. Информатика, 51(2): 489–498. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-489-498

Optimization of Message Transmission in Network Information Systems

Victor I. Sumin, Mikhail A. Lukin

Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia,
1a Irkutskaya St, Voronezh, 394072, Russia
E-mail: viktorsumin51@yandex.ru, lykinma@mail.ru

Abstract. The article analyzed message routing for a network information system using an oriented graph, for which, in accordance with the specified requirements and restrictions, a set of two-way connections was determined for each pair of terminal nodes through transit nodes. The process of formalizing message transmission in network information systems is carried out using graph theory with specified requirements and constraints. This article uses a group of constraints that include the structure and length of the route. Based on the proposed method, the relationship between the number and length of routes is determined depending on the degree of connectivity of the graph of this network. The article presents a lemma based on which the set of all message transmission routes is determined in accordance with the specified restrictions of message transmission routes.

Keywords: network information systems, undirected graph, digraph, message transmission priorities, weighted oriented graph, integer weight function, vertex image on the graph, graph connectivity

For citation: Sumin V.I., Lukin M.A. 2024. Optimization of Message Transmission in Network Information Systems. Economics. Information technologies, 51(2): 489–498 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-489-498

Введение

Структура любой сетевой информационной системы (СИС) состоит из узлов, через которые передаются различные сообщения и их условно можно разделить на узлы оконечные (УО) и узлы транзитные (УТ). Если любая пара УО, которая имеет возможность передавать сообщения друг другу, то будем говорить, что они находятся в сигнальном отношении. Для реализации сигнальных отношений необходимо сформировать множество маршрутов передачи сообщений через УТ, как в прямом, так и в обратном направлениях. Эту задачу целесообразно решать с использованием теории графов. Для этого необходимо определить произвольную структуру и провести анализ маршрутов передачи сообщений в СИС на основе графа с произвольно заданным набором параметров маршрутов. Причем построение такого графа необходимо определять с задаваемыми ограничениями на маршруты передачи сообщений в СИС [Акимов, 2003; Зыков, 2004; Жиляков и др., 2019; Белов и др. 2018].

Объекты и методы исследования

Целью работы является оптимизация передачи сообщений в сетевых информационных системах.

Постановка задачи. Определим необходимые требования при разработке маршрутов передачи сообщений в СИС [Сумин и др. 2021; Сумин и др. 2023а; Сумин и др. 2023б]:

1. Передача сообщений должна осуществляться по кратчайшему маршруту через УТ, количество УТ и будет определять его длину;
2. В том случае если УО смежен другому УО, тогда маршрут может не иметь УТ;
3. Количество УТ для передачи сообщений в СИС от УО, который будем называть узлом источника (УИ) к узлу УО, который будем называть узлом назначения (УН) не должен быть больше определенного числа;
4. Любой УТ, который осуществляет передачу сообщений в СИС, может быть включен в маршрут только один раз (не должно быть циклов и петель);
5. Из множества кратчайших доступных маршрутов выбирается любой;
6. Если из множества кратчайших доступных маршрутов некоторые недоступны тогда, выбирается любой с минимальной длиной;
7. Из множества кратчайших доступных маршрутов выбирается маршрут с наибольшим приоритетом [Сумин, Лукин, 2022; Лукин, Сумин, 2023; Лукин, 2022];
8. Из множества кратчайших доступных маршрутов выбираются маршруты, имеющие наибольший приоритет, т. е. СИС функционирует в нормальном режиме, маршруты с низшим приоритетом функционируют только в том случае, если маршруты более высоких приоритетов недоступны;
9. Между узлами УИ и УН СИС должно существовать не менее одного маршрута, как в прямом направлении, так и в обратном направлениях (двухсторонняя связь).

Исходя из этих требований структура СИС должна для каждой пары УИ и УН обеспечить два маршрута в прямом и обратном направлениях, не должно иметься циклов и петель, количество УТ должно быть меньше числа $T \geq 0$, а количество приоритетов выбора направлений передачи сообщений в любом УТ должно быть меньше числа $P \geq 1$. Передача сообщения в направлении УН должна быть равно разделена в каждом узле между всеми маршрутами одной длины. Для решения задачи маршрутизации в СИС будем использовать теорию графов.

Результаты и их обсуждение

Актуальной проблемой при функционировании СИС является оптимизация и надежность передачи сообщений в таких системах. Наиболее актуальным подходом для анализа функционирования СИС является применение теории графов [Акимов, 2003; Зыков, 2004; Жилияков и др., 2019]. Существующие модели и методы требуют дальнейшего развития в направлении определения ограничений на маршрутизацию передачу сообщений в СИС, что потребует разработки вычислительных алгоритмов. Следовательно, актуальна задача разработки подходов к анализу маршрутизации на графе СИС произвольной структуры с разнообразным набором параметров маршрутизации для оптимизации и надежности передачи сообщений в таких системах [Сумин, Лукин, 2022; Лукин, Сумин, 2023; Лукин, 2022]. Системы специального назначения, которые используют свои СИС, становятся все более распространенными и необходимы для оперативного решения задач [Сумин и др. 2023а; Сумин и др. 2023б; Сумин, Лукин, 2022].

Определим неориентированный граф $G = (V, E)$, где V вершинами являются узлы УО и УТ, а дуги – E это дуги между вершинами УО и УТ. Пусть V_1 это вершины УО, и V_2 – это вершины УТ. Следовательно, множество вершин V нашего графа состоит из множеств V_1 и V_2 т. е. $V = V_1 \cup V_2$. В соответствии с определением необходимых требований (9) при разработке маршрутов передачи сообщений в СИС определим множество R , двухсторонних связей в виде $R \subset V_1 \times V_2$. Следовательно, для множества R справедливы выражения $(u, v) \in R$ и $(v, u) \in R$.

Определим $l(u, v) = (u, x_1, \dots, x_t, v)$ как маршрут передачи сообщений из УИ u в УО v , а через $L(u, v) = t$ – определим количество УТ этого маршрута. Определим $\varphi(u, v)$ как множество маршрутов из УИ u в УО v графа G . Отметим тот факт, что для УИ u и УО v $(u, v) \in R$ граф G должны существовать выражения $\varphi(u, v)$ и $\varphi(v, u)$.

$$\varphi = \bigcup_{(u,v) \in R} \varphi(u, v), \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим СИС, приведенную на рисунке 1, и определим все маршруты в ней в соответствии с необходимыми требованиями при разработке маршрутов передачи сообщений в этой сети.

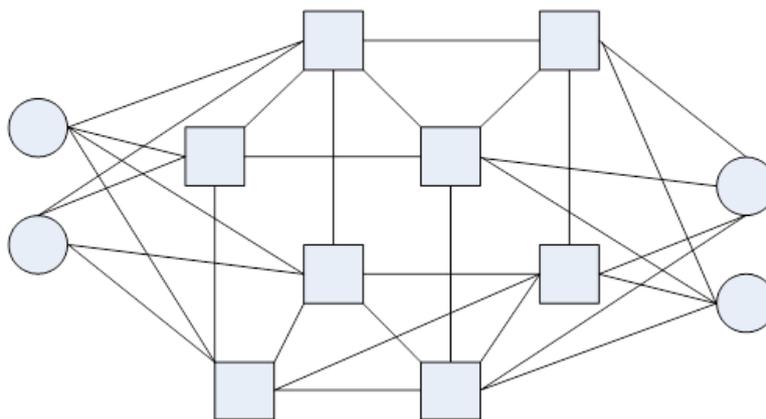


Рис. 1. Пример структуры сетевой информационной системы
 Fig. 1. An example of the structure of a network information system

Где на рисунке 1 окружности – это УО, квадраты – это УТ, линии – это каналы передачи сообщений.

На рисунке 2 наша рассматриваемая СИС представлена в виде граф $G = (V, E)$.

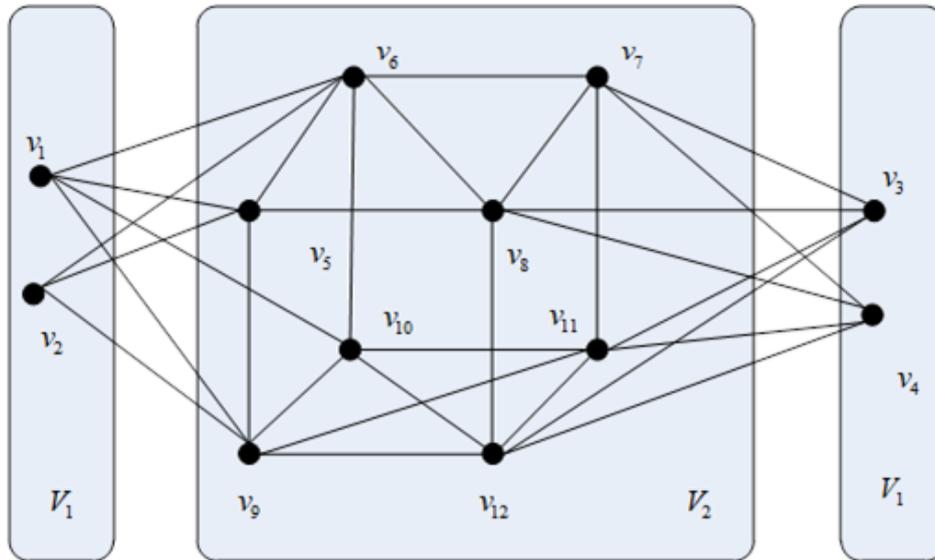


Рис. 2. Структура графа $G = (V, E)$

Fig. 2. Graph structure $G = (V, E)$

Для рассматриваемого графа $G = (V, E)$ получим, что $V_1 = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, а $V_2 = \{v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}\}$. Учитывая, что у нас в СИС двухсторонняя связь, тогда справедливо выражение $R = \bigcup_{i,j} \{(v_i, v_j)\}, i = \overline{1,4}, j = \overline{1,4}, i \neq j$.

Определим множества

$$V_1^i = \{u \in V_1 : (u, v_i) \in R, u \neq v_i\} \quad (2)$$

и

$$\varphi(v_i) = \bigcup_{u \in V_1^i} \varphi(u, v_i). \quad (3)$$

Множество V_1^i формируется из вершин графа, соответствующее узлам СИС, которые имеют в СИС двухстороннюю связь с УО v_i . Следовательно, $\varphi(v_i)$ формируется из вершин графа на основе всех маршрутов с УО v_i . Основываясь на выражениях (1) и (3), справедливо выражение (4).

$$\varphi = \bigcup_{v_i \in V_1} \varphi(v_i) \quad (4)$$

Определим орграф $G_{v_i} = (V^i, A_{v_i})$, в котором сконцентрирована вся совокупность маршрутов графа G к УО v_i , поэтому $V = V_1 \cup V_2$, тогда справедливо выражение (5).

$$V^i = V_1^i \cup V_2^i \cup \{v_i\}, \quad (5)$$

где V_1^i формируется на основе (2), а V_2^i будет представлено в виде:

$$V_2^i = \{x \in V_2 : (u, \dots, x, \dots, v_i) \in \varphi(v_i), (u, v_i) \in R\}. \quad (6)$$

На рисунке 3 приведена иллюстрация орграфа G_{v_i} , а также УИ $V_1^i = \{u_1, u_2\}$ и УТ $V_2^i = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$ и маршруты передачи сообщений УИ к УО v_i $\varphi(u_1, v_i)$ и $\varphi(u_2, v_i)$.

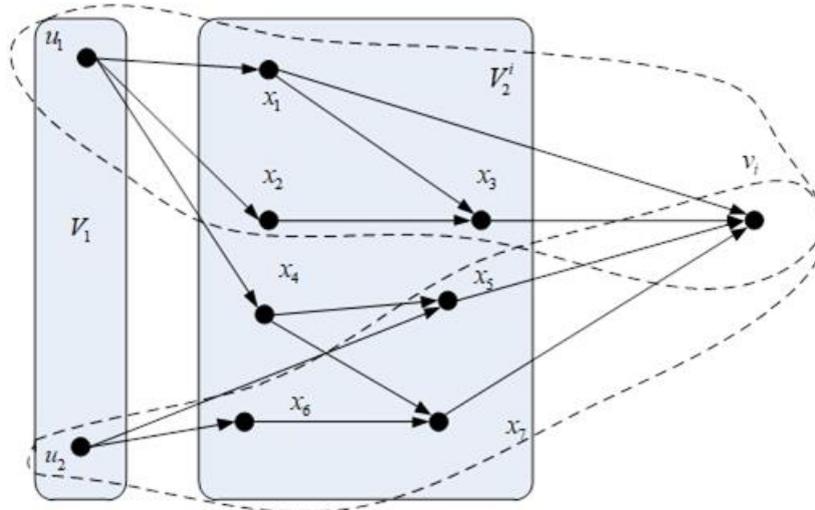


Рис. 3. Структура орграфа G_{v_i}

Fig. 3. Graph structure G_{v_i}

Для орграфа G_{v_i} , приведенного на рисунке 3, зададим множество $\rho = \{1, \dots, P\}$, которое определит значения приоритетов передачи сообщений для каждого направления в СИС, на основе орграфа G_{v_i} создадим взвешенный ориентированный граф $G_{v_i}[\rho] = (V^i, A_{v_i}, \rho)$ [Акимов, 2003; Зыков, 2004; Жилияков и др., 2019; Лукин, Сумин, 2023; Лукин, 2022]. Для графа $G_{v_i}[\rho] = (V^i, A_{v_i}, \rho)$ для каждого ребра определим целочисленную весовую функцию $\rho(\cdot, \cdot)$ с использованием множества $\rho = \{1, \dots, P\}$. Определим множество $D^i(u)$, как образ вершины на графе G_{v_i} (рисунок 4).

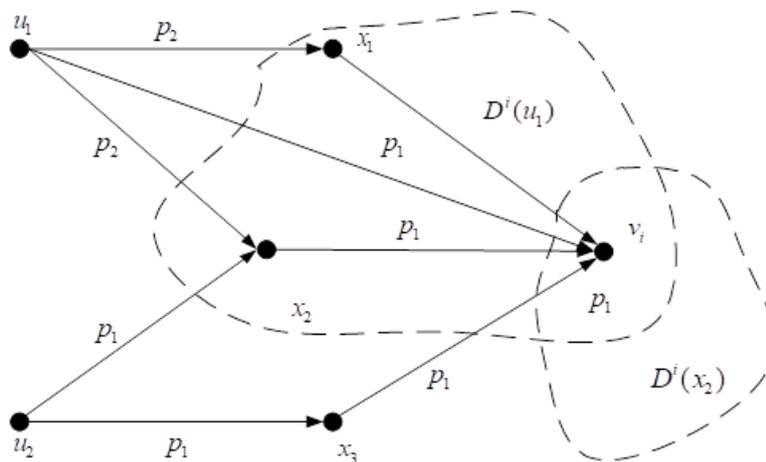


Рис. 4. Пример графа $G_{v_i}[\rho]$

Fig. 4. Graph structure $G_{v_i}[\rho]$

На рисунке 4 считаем, что $\rho = \{p_1, p_2\}$, где $p_1 < p_2$ и поэтому $D^i(u_1) = \{x_1, x_2, v_i\}$, а $D^i(x_2) = \{v_i\}$. На основе приведенного подхода по аналогии можно определить другие образы вершин на графе G_{v_i}

Основываясь на вышеизложенном, введем ограничения на маршрутизацию для нашей СИС.

Определим ограничения на маршрутизацию для нашей СИС в виде ориентированного графа G_{v_i} , в соответствии с определением необходимых требований (9) при разработке маршрутов передачи сообщений в СИС определим множество R , двухсторонних связей в виде $R \subset V_1 \times V_2$. Для каждой пары УО $(u, v) \in R$ определим ограничения маршрутов передачи сообщений, такие что:

1. Количество УТ для любого маршрута должно быть ограничено ($0 \leq L(u, v) \leq T$).
2. Любой маршрут передачи сообщений должен представлять из себя простую цепь графа G и все УТ должны принадлежать множеству V_2 .

Определение таких маршрутов было решено, при условии, что любая вершина графа G передает сообщения всем вершинам этого графа, т. е. он связный. Ясно, что в графе G общее количество вершин, а также их длина имеет прямую зависимость от числа $\kappa(G)$, которое естественным образом зависит от вершинной связности. Очевиден тот факт, что надежность функционирования СИС, а также понижения длин маршрутов требуется повысить связность в этой системе или в подграфе, который должен определяться на множестве V_2 . Очевидно, что длина маршрутов в графе G будет понижаться, если связность повышается.

Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим несмежные вершины v_i и v_j (рисунок 5) некоторого связанного графа и поэтому будет присутствовать в этом графе хотя бы один маршрут из УИ v_i в УО v_j - $l_1(v_i, v_j) = (v_i, v_{i+1}, \dots, v_{j-1}, v_j)$. Как показано на рисунке 5, добавим дугу (v_i, v_j) , что повлечет за собой повышение связности и появление нового маршрута $l_2(v_i, v_j) = (v_i, v_j)$.

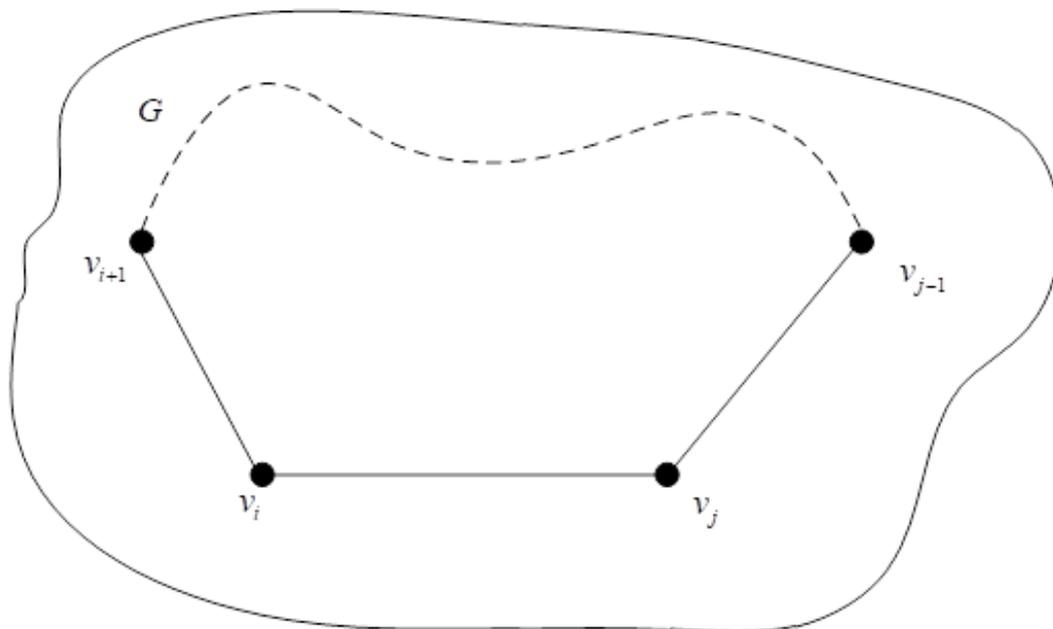


Рис. 5. Уменьшение длины маршрутов в графе G
 Fig. 5. Reducing the length of routes in graph G

Как видно из рисунка 5, справедливо неравенство $|l_2(v_i, v_j)| < |l_1(v_i, v_j)|$ и следовательно, число маршрутов в графе G повысилось, а их длина уменьшается.

Рассмотрим графы G_1 , и G_2 , на рисунке б а) и б) соответственно.

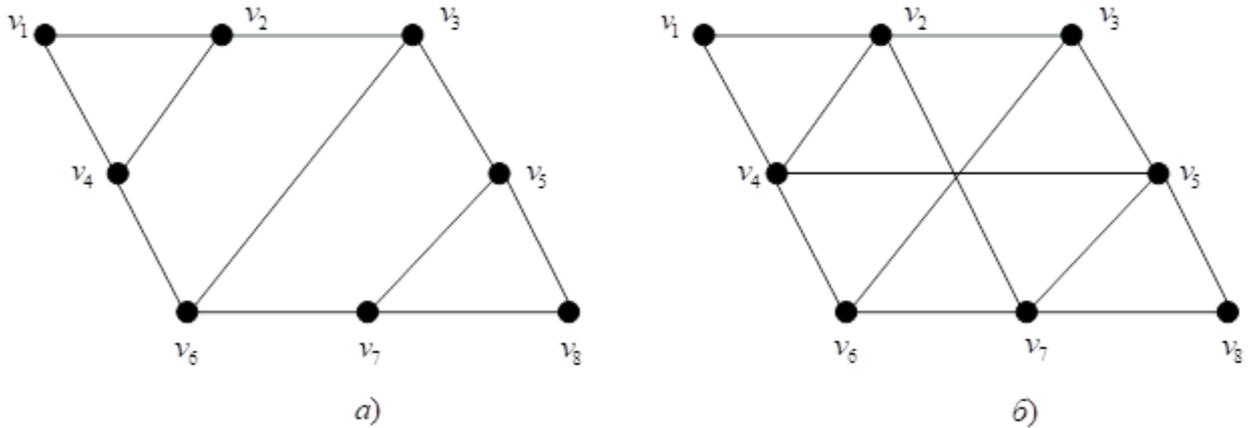


Рис. 6. Графы G_1 и G_2 соответственно
 Fig. 6. Graphs G_1 and G_2 , respectively

Для графов G_1 и G_2 (рисунок 6) существует множество УО $V_1 = \{v_1, v_8\}$ и УТ $V_2 = \{v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$ и введены ограничения УТ на маршруте $T=3$, тогда множество R примет вид $R = \{(v_1, v_8), (v_8, v_1)\}$.

На рисунке 7 приведен вид подграфов G'_1 и G'_2 , которые образованы из множества УТ V_2 .

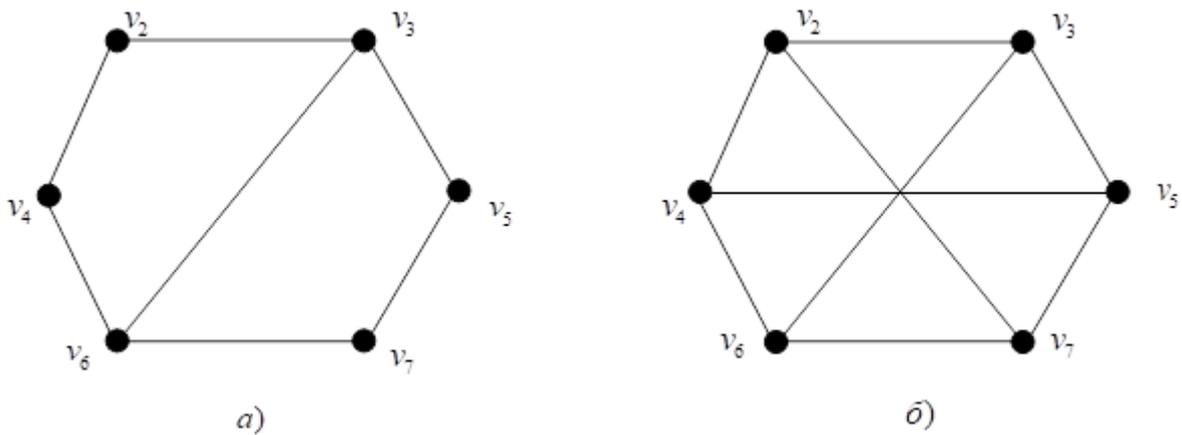


Рис. 7. Подграфы G'_1 и G'_2
 Fig. 7. Subgraphs G'_1 and G'_2

Анализируя подграфы G'_1 и G'_2 на рисунке 7 очевидно, что $\kappa(G'_1) = 2$, а $\kappa(G'_2) = 3a$. Определим основные маршруты на графе G_1 , из УИ v_1 , в УН v_8 , т. е. множество $\varphi(v_1, v_8)$ согласно ограничениям маршрутов передачи сообщений примет следующий вид:

$$\varphi(v_1, v_8) = \left\{ \begin{array}{l} (v_1, v_2, v_3, v_5, v_8), \\ (v_1, v_4, v_6, v_7, v_8) \end{array} \right\}.$$

Для графа G_2 множество $\varphi(v_1, v_8)$ примет следующий вид:

$$\varphi(v_1, v_8) = \left\{ \begin{array}{l} (v_1, v_2, v_3, v_5, v_7), \\ (v_1, v_4, v_6, v_7, v_8), \\ (v_1, v_2, v_7, v_8), \\ (v_1, v_4, v_5, v_8), \\ (v_1, v_2, v_4, v_5, v_8), \\ (v_1, v_2, v_7, v_5, v_8), \\ (v_1, v_4, v_2, v_7, v_8), \\ (v_1, v_4, v_5, v_7, v_8) \end{array} \right\}.$$

Для рассматриваемого случая были определены все маршруты передачи сообщений в виде множества $\varphi(v_1, v_8)$ графа G_1 и два маршрута (v_1, v_2, v_7, v_8) и (v_1, v_4, v_5, v_8) из дополнительных маршрутов, которые очевидно имеют меньшую длину маршрута относительно множества $\varphi(v_1, v_8)$.

Связности вершин подграфа $k(\cdot)$, как очевидно, что для любого графа G справедливо $\kappa(G) \leq \lambda(G) \leq \delta(G)$, где $\lambda(G)$ – количество связности УТ этого графа, а $\delta(G)$ – минимальная степень УТ этого графа [Акимов, 2003; Зыков, 2004; Жилияков и др., 2019].

Множество $\varphi(v_i)$ определяет множество маршрутов исследуемого графа G с УН v_i , учитывая тот факт, что множество φ определяется из выражения (4), тогда справедлива лемма.

Лемма. Если все маршруты множеств $\varphi(v_i)$ должны быть определены с ограничениями 1 и 2 маршрутов передачи сообщений для всех $v_i \in V_1$, тогда все маршруты множества φ удовлетворяют ограничениям 1 и 2.

Заключение

В статье определены ограничения 1 и 2 на маршрутизацию для нашей СИС в виде ориентированного графа G_{v_i} , в соответствии с определением необходимых требований 9 при разработке маршрутов передачи сообщений в СИС определено множество R , двухсторонних связей в виде $R \subset V_1 \times V_2$. Для каждой пары УО $(u, v) \in R$ определены ограничения маршрутов передачи сообщений. В статье приведена лемма, которая говорит о том, что если все маршруты множеств $\varphi(v_i)$ должны быть определены с ограничениями 1 и 2 маршрутов передачи сообщений для всех $v_i \in V_1$, тогда все маршруты множества φ удовлетворяют ограничениям 1 и 2.

Список литературы

- Акимов О.Е. 2003. Дискретная математика: логика, группы, графы. 2-е изд., доп. М.: Лаборатория Базовых Знаний. 376 с.
- Белов С.П., Жилияков Е.Г., Белов А.С., Золотарь Н.И. 2018. Об особенностях мониторинга занятости частотных ресурсов каналов связи при передаче информации когнитивными системами беспроводной связи. Научный результат. Информационные технологии. 3(3): 37–44.
- Жилияков Е.Г., Белов С.П., Олейник И.И., Трубицына Д.И. 2019. Обобщённый субполосный анализ и синтез сигналов. Инфокоммуникационные технологии. 17(2): 139–145.
- Зыков А. А. 2004. Основы теории графов. М.: Вузовская книга, 662 с.
- Лукин М.А. 2022. Формирование входных данных экспертной системы для оценки устойчивости функционирования сетевых информационных систем. Вестн. Воронеж. ин-та ФСИН России. 4. 121–127.
- Лукин М.А., Сумин В.И. 2023. Идентификация и оценка важности ресурсов сетевых информационных систем. Вестн. Воронеж. ин-та ФСИН России. 3. 112–117.
- Сумин В.И., Грачев Е.Д., Громов Ю.Ю., Тютюнник В.М. 2023а. Математические модели определения

- времени обработки запросов на серверах информационных систем специального назначения. Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. № 10. 11–15.
- Сумин В.И., Громов Ю.Ю., Тютюнник В.М. 2023б. Оптимизация функционирования информационных систем специального назначения. Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. № 5. 1–6.
- Сумин В.И., Лукин М.А. 2022. Методика оценки устойчивости функционирования сетевых информационных систем на основе экспертных систем при враждебных воздействиях. Вестн. Воронеж. ин-та ФСИИ России. 2. 133–138.
- Сумин В.И., Смоленцева Т.Е., Громов Ю.Ю., Тютюнник В.М. 2021. Анализ функционирования и структурная декомпозиция информационных систем специального назначения. Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. № 8. 5–14.
- Ярошевич Н.Ю. 2023. Механизм управления блокчейн-платформой: теоретические подходы к проблеме Экономика. Информатика, 50(3): 2687-0932. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-3-552-568

References

- Akimov O. E. 2003. Diskretnaja matematika: logika, gruppy, grafy. 2-e izd [Discrete mathematics: logic, groups, graphs]. dop. M.: Laboratorija Bazovyh Znanij, 376 p.
- Belov S.P., Zhiljakov E.G., Belov A.S., Zolotar' N.I. 2018. Ob osobennostjah monitoringa zanjatosti chastotnyh resursov kanalov svjazi pri peredache informacii kognitivnymi sistemami besprovodnoj svjazi. Nauchnyj rezul'tat. Informacionnye tehnologii. 3(3): 37–44.
- Zhiljakov E.G., Belov S.P., Olejnik I.I., Trubicyna D.I. 2019. Obobshhennyj subpolosnyj analiz i sintez signalov. Infokommunikacionnye tehnologii [Generalized subband analysis and signal synthesis]. 17(2): 139–145.
- Zykov A. A. 2004. Osnovy teorii grafov [Fundamentals of graph theory]. M.: Vuzovskaja kniga, 662 p.
- Lukin M.A., Sumin V.I. 2023. Identifikacija i ocenka vazhnosti resursov setevyh informacionnyh system [Identification and assessment of the importance of network information system resources]. Vestn. Voronezh. in-ta FSIN Rossii. 3. 112–117.
- Lukin M.A. 2022. Formirovanie vhodnyh dannyh jekspertnoj sistemy dlja ocenki ustojchivosti funkcionirovanija setevyh informacionnyh system [Formation of input data of an expert system to assess the stability of the functioning of network information systems]. Vestn. Voronezh. in-ta FSIN Rossii. 4. 121–127.
- Sumin V.I., Grachev E.D., Gromov Ju.Ju., Tjutjunnik V.M. 2023a. Matematicheskie modeli opredelenija vremeni obrabotki zaprosov na serverah informacionnyh sistem special'nogo naznachenija [Mathematical models for determining the processing time of requests on servers of special-purpose information systems]. Nauchno-tehnicheskaja informacija. Serija 2: Informacionnye processy i sistemy. № 10. 11–15.
- Sumin V.I., Gromov Ju.Ju., Tjutjunnik V.M. 2023b. Optimizacija funkcionirovanija informacionnyh sistem special'nogo naznachenija [Optimization of the functioning of special purpose information systems]. Nauchno-tehnicheskaja informacija. Serija 2: Informacionnye processy i sistemy. № 5. 1–6.
- Sumin V.I., Lukin M.A. 2022. Metodika ocenki ustojchivosti funkcionirovanija setevyh informacionnyh sistem na osnove jekspertnyh sistem pri vrazhdebnyh vozdeystvijah [Methodology for assessing the stability of the functioning of network information systems based on expert systems under hostile influences]. Vestn. Voronezh. in-ta FSIN Rossii. 2. 133–138.
- Sumin V.I., Smolenceva T.E., Gromov Ju.Ju., Tjutjunnik V.M. 2021. Analiz funkcionirovanija i strukturnaja dekompozicija informacionnyh sistem special'nogo naznachenija. Nauchno-tehnicheskaja informacija [Analysis of the functioning and structural decomposition of special purpose information systems]. Serija 2: Informacionnye processy i sistemy. № 8. 5–14.
- Yaroshevich N.Y. 2023. Blockchain Platform Management Mechanism: Theoretical Approaches to the Problem. Economics. Information technologies, 50(3): 552-568 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-3-552-568

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.



Поступила в редакцию 21.03.2024

Поступила после рецензирования 28.05.2024

Принята к публикации 05.06.2024

Received March 21, 2024

Revised May, 28 2024

Accepted June, 05 2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сумин Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем, Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия

Лукин Михаил Алексеевич, преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники, Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor I. Sumin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Security of Telecommunication Systems, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia

Mikhail A. Lukin, Lecturer of the Department of Fundamentals of Radio Engineering and Electronics, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia