

В.Л. Грачев
(ВНИИ ГОЧС МЧС России; e-mail: g-vl@mail.ru)

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АНТИКРИЗИСНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Проведена оценка устойчивости структуры автоматизированных систем антикризисного управления федерального и регионального уровней в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера путём проведения топологического экспресс-анализа.

Ключевые слова: автоматизированная система, топологический анализ, структура, устойчивость.

V.L. Grachev

TOPOLOGICAL ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF THE AUTOMATED SYSTEM OF CRISIS MANAGEMENT IN EMERGENCY SITUATIONS

The evaluation of the stability of the structure of automated systems of crisis management at the federal and regional levels in emergency situations of natural and technogenic character by conducting a topological proximate analysis was carried out.

Key words: automated system, topological analysis, structure, stability.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 30 ноября 2016 г.

Система антикризисного управления федерального или регионального уровней в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера должна обладать возможностью выполнения своих функций в условиях воздействия дестабилизирующих факторов ЧС, в том числе в военное время. Соответственно, одной из необходимых характеристик **автоматизированной системы антикризисного управления в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера федерального или регионального уровней (АС АКУЧС)** является её устойчивость, понимаемая как комплексное свойство АСУ военного назначения, характеризующее её живучестью, помехоустойчивостью и надёжностью [1]. Оценку устойчивости АС АКУЧС возможно провести с помощью топологического экспресс-анализа её структуры, который позволяет:

- получить информацию о степени и неравномерности загруженности элементов (объектов, подсистем, функциональных блоков) системы;
- определить наличие резервирования путей передачи воздействий между отдельными элементами системы;
- определить максимальное число звеньев при передаче воздействия;
- определить степень централизации системы.

Для проведения экспресс-анализа необходимо описать структуру АС АКУЧС на основе теории графов [2, 3]. В целях получения общей модели будем рассматривать ЧС некоего среднего гипотетического масштаба, в устранении которой участвуют следующие уровни управления системой: соответствующий масштабу ЧС средний, а также относительно его верхний и нижний. Эти уровни можно интерпретировать, например, как федеральный, межрегиональный и региональный (для вертикали управления НЦУКС МЧС России) либо как межмуниципальный, муниципальный и локальный (для системы-112). Соответствующая организационно-территориальная модель описана в [4].

На рис. 1 представлена модель структуры такой АС АКУЧС в виде ориентированного графа (орграфа) $G(V, R)$, где V – множество точек, которые являются узлами или вершинами графа, а R – множество связей между вершинами, которые являются рёбрами графа.

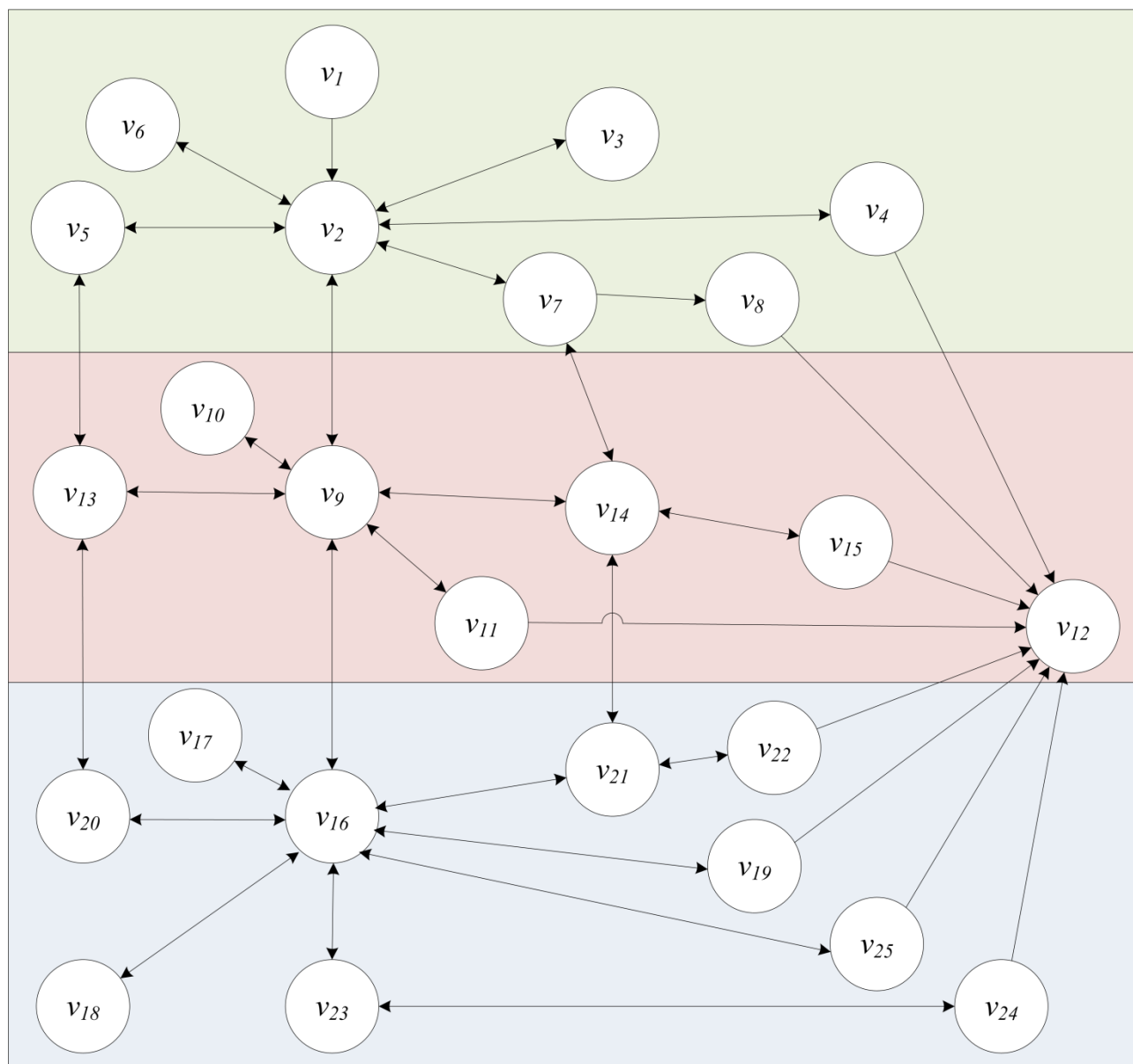


Рис. 1. Обобщенная модель структуры гипотетической АС АКУЧС

Вершинами v_i орграфа $G(V, R)$ "являются" органы повседневного управления, информационные центры и *дежурно-диспетчерские службы (ДДС)* федеральных органов исполнительной власти и местных органов исполнительной власти, ДДС, силы и средства различных уровней подчинения и принадлежности, а также организации, обеспечивающие поддержку принятия решения. Рёбра r_{ij} соединяют вершины орграфа $G(V, R)$ и характеризуют направление поступления управленческих воздействий, а также наличие обратной связи – результат выполнения команды (мероприятия, операции).

Орграф, представляющий структуру гипотетической АС АКУЧС, разработан в предположении, что для ликвидации ЧС среднего уровня, произошедшей на потенциально-опасном объекте, привлекаются силы и средства этого объекта, органов местного самоуправления и федеральных органов исполнительной власти нижнего и среднего уровней, а также МЧС России верхнего уровня. Силы и средства федеральных органов исполнительной власти приводятся в повышенную готовность.

Характеристики вершин v_i орграфа $G(V, R)$ следующие:

- v_1 – центр управления системы антикризисного управления;
- v_2 – орган повседневного управления в ЧС верхнего уровня;
- v_3 – ДДС "территориальной" администрации верхнего уровня;
- v_4 – силы и средства МЧС России, подчинённые органу повседневного управления в ЧС верхнего уровня;
- v_5 – организация, предоставляющая данные мониторинга (верхний уровень);
- v_6 – организация, обеспечивающая поддержку принятия решений (верхний уровень);
- v_7 – ДДС федеральных органов исполнительной власти верхнего уровня;
- v_8 – силы и средства федеральных органов исполнительной власти верхнего уровня подчинения (аварийно-восстановительные службы, оперативные службы ликвидации ЧС и др.);
- v_9 – орган повседневного управления в ЧС среднего уровня;
- v_{10} – ДДС "территориальной" администрации среднего уровня;
- v_{11} – силы и средства МЧС России, подчинённые органу повседневного управления в ЧС среднего уровня;
- v_{12} – зона ЧС;
- v_{13} – организация, предоставляющая данные мониторинга (средний уровень);
- v_{14} – ДДС федеральных органов исполнительной власти среднего уровня;
- v_{15} – силы и средства федеральных органов исполнительной власти среднего уровня подчинения;
- v_{16} – орган повседневного управления в ЧС нижнего уровня;
- v_{17} – ДДС "территориальной" администрации нижнего уровня;

v_{18} – оборудование информирования и оповещения населения нижнего уровня;

v_{19} – силы и средства МЧС России нижнего уровня подчинения;

v_{20} – организация, предоставляющая данные мониторинга (нижний уровень);

v_{21} – ДДС федеральных органов исполнительной власти нижнего уровня;

v_{22} – силы и средства федеральных органов исполнительной власти нижнего уровня подчинения;

v_{23} – ДДС органов исполнительной власти нижнего уровня;

v_{24} – силы и средства органов исполнительной власти нижнего уровня;

v_{25} – ДДС, силы и средства потенциально-опасных объектов.

Характеристики рёбер r_{ij} , связывающих вершину v_i и вершину v_j , орграфа $G(V, R)$, представляют собой соответствующие управляющий сигнал или обратную связь, например:

$r_{9, 10}$ – обратная связь: орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → ЕДДС "территориальной" администрации среднего уровня;

$r_{9, 11}$ – управляющий сигнал: орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → силы и средства МЧС России, подчинённые органу повседневного управления в ЧС среднего уровня.

При исследовании структуры АС АКУЧС особое значение имеет выделение элементов структуры, которые соответствуют изолированным, висячим и тупиковым вершинам.

Изолированные вершины не взаимосвязаны друг с другом и между ними отсутствует всякое взаимодействие. В представленной модели структуры АС АКУЧС изолированные вершины отсутствуют, что показывает на структурную связность всех её элементов (подсистем).

В висячие вершины нельзя попасть ни из одной другой вершины графа. В орграфе $G(V, R)$ единственная висячая вершина v_1 соответствует самому верхнему уровню управления, что показывает на единую централизацию системы.

Из тупиковых вершин графа нельзя попасть в другие вершины. В представленной модели структуры АС АКУЧС это элементы, на которых замыкается управление (на которые направлено управляющее воздействие). В зависимости от режима функционирования системы в качестве них могут выступать: район ЧС (возможной ЧС), объект экономики, объект или район, в котором проводятся предупредительные, восстановительные мероприятия, мероприятия по локализации ЧС и т.д.

Для выявления изолированных, тупиковых и висячих вершин необходимо построить матрицу смежности A , которая будет отражать наличие связей между вершинами орграфа $G(V, R)$. Элементами матрицы смежности A являются значения α_{ij} , характеризующие наличие и "направление" рёбер между вершинами, которые определяются следующим образом:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если из вершины с номером } i \text{ можно перейти в вершину } j; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Для каждой вершины $k = 1, 2, 3, \dots, n$ орграфа $G(V, R)$ необходимо найти вектор (v_k, v^k) с компонентами

$$v_k = \sum_{i=1}^n \alpha_{ki}, \quad (2)$$

$$v^k = \sum_{j=1}^n \alpha_{jk}, \quad (3)$$

где v_k – число рёбер, выходящих из k -й вершины;
 v^k – число рёбер, входящих в k -ю вершину.

Если $v_k = v^k = 0$ – вершина k изолированная, $v_k = 0$ – вершина k тупиковая, $v^k = 0$ – вершина k висячая.

Исследование особенностей связей между элементами структуры направлено на выявление в графе петель, контуров и сильносвязных подграфов. Петля интерпретируется как наличие связи между входом и выходом одного и того же элемента. Контур образует замкнутый путь – чередующуюся последовательность рёбер и вершин, в которой начальная и конечная вершины совпадают. Наличие контура в орграфе $G(V, R)$ характеризует поступление управляющего сигнала на выполнение мероприятий (операций), а обратная связь – поступление докладов о ходе выполнении мероприятий (операций). Несложно выделить, например, следующие пути прохождения управляющих сигналов в виде контуров в системе управления АС АКУЧС:

- $v_2, v_9, v_{14}, v_{15}, v_{14}, v_9, v_2$ [орган повседневного управления в ЧС верхнего уровня → орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → ДДС федеральных органов исполнительной власти среднего уровня → силы и средства федеральных органов исполнительной власти среднего уровня подчинения → ДДС федеральных органов исполнительной власти среднего уровня → орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → орган повседневного управления в ЧС верхнего уровня];

- $v_2, v_9, v_{14}, v_{15}, v_{14}, v_9, v_2$ [орган повседневного управления в ЧС верхнего уровня → орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → орган повседневного управления в ЧС нижнего уровня → силы и средства МЧС России, подчинённые органу повседневного управления в ЧС нижнего уровня → орган повседневного управления в ЧС нижнего уровня → орган повседневного управления в ЧС среднего уровня → орган повседневного управления в ЧС верхнего уровня].

Диаметр структуры графа d – это длина кратчайшего пути между наиболее удалёнными вершинами графа, равная числу рёбер, составляющих этот путь:

$$d = \max d_{ij}, \quad (4)$$

где d_{ij} – длина кратчайшего пути между вершинами v_i и v_j .

Диаметр структуры d характеризует максимальный путь поступления управляющего сигнала, по его значению можно косвенно судить о ряде предельных параметров системы, в частности о надёжности, длительности задержек сообщений, инерционности и т.д. Для определения диаметра структуры необходимо построить матрицу расстояний D между вершинами орграфа $G(V, R)$, элементами которой являются длины кратчайших путей d_{ij} между вершинами v_i, v_j орграфа $G(V, R)$.

Близость вершин v_i и v_j между собой определяется через минимальную длину пути для ориентированного графа:

$$q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}, (i \neq j). \quad (5)$$

Этот параметр используется для количественной оценки структурной компактности орграфа, также часто используется относительный показатель:

$$q_o = \frac{q}{q_{\min}} - 1, \quad (6)$$

где $q_{\min} = n \cdot (n - 1)$.

Структурная компактность показывает степень близости элементов друг с другом. Значение параметра $q_o > 0$ характеризует наличие разобщённости по связям между некоторыми элементами системы (в идеальном случае все элементы связаны друг с другом $q_o = 0$, при этом система имеет максимальную надёжность).

Для характеристики неравномерности загрузки элементов структуры используется индекс центральности γ , который определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{1}{(n - 1) \cdot (v_{\max} - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (v_{\max} - v(i)), \quad (7)$$

где $v(i)$ – степень вершины i ;

$$v_{\max} = \max v(i).$$

Близость индекса центральности к единице характеризует степень централизации управления силами и средствами в зависимости от уровня и масштабов ЧС.

Структурная избыточность δ – это параметр, отражающий превышение общего числа связей над минимально необходимым числом связей. Она определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot (n - 1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \right) - 1. \quad (8)$$

Данная структурная характеристика используется для косвенной оценки экономичности и надёжности исследуемых систем. Как известно (закон избыточности частей системы), приблизительно 20 % функций, элементов и связей системы выполняют около 80 % работы. При создании работоспособной системы нужно учитывать, что для выполнения какой-либо работы кроме основных

элементов и связей (выполняющих главную функцию), необходимо ещё приблизительно 80 % вспомогательных, причём они, как правило, выполняют только 20 % основной работы.

Для систем с максимальной избыточностью структура представляется сильносвязным графом ($\delta > 0$), для систем с минимальной избыточностью $\delta = 0$, для систем несвязных $\delta < 0$. Таким образом, система с большей избыточностью δ потенциально более надёжна, однако в ряде задач структурной надёжности её целесообразно дополнить другим параметром, который учитывал бы неравномерность распределения связей, то есть отклонение заданного распределения степеней вершины от равномерного распределения.

Для определения неравномерности распределения связей в структуре графа можно использовать квадратичное отклонение имеющегося распределения степеней вершин от равномерного:

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \sum_{i=1}^n (v(i) - m_c)^2 = \sum_{i=1}^n v(i)^2 - 4 \frac{m}{n} \sum_{i=1}^n v(i) + 4 \frac{m^2}{n} = \\ &= \sum_{i=1}^n v(i)^2 - 4 \frac{m^2}{n},\end{aligned}\quad (9)$$

где m_c – средняя степень вершины графа.

Показатель σ^2 характеризует неполное использование возможностей заданной структуры в достижении максимальной связности и свидетельствует о различии в уровнях загруженности элементов системы.

Если нормировать показатель σ^2 относительно его возможного максимального значения σ_{\max}^2 (достигается в системе, имеющей максимально возможное число вершин, имеющих одну связь), то получится удобный относительный показатель σ_o^2 : чем его значение меньше, тем равномернее загруженность элементов.

Для орграфа, характеризующего АС АКУЧС, максимальное значение σ^2 достигается в случае, если все вершины, соответствующие её объектам, связаны между собой не напрямую, а через единственную, например, обозначающую орган повседневного управления в ЧС среднего уровня. Тогда

$$m = 2n + f - 4, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n v(i)^2 = 4n^2 + f^2 - 12n + 5f + 8, \quad (11)$$

где f – число вершин, обозначающих силы и средства, принадлежащие МЧС России, иным федеральным органам государственной власти и органам исполнительной власти субъекта Российской Федерации разных уровней.

Соответственно, значение σ_{\max}^2 определяется по формуле:

$$\sigma_{\max}^2 = 4n^2 + f^2 - 28n - 11f + 72 - 4 \frac{(f - 4)^2}{n}. \quad (12)$$

Итак, в результате проведения топологического экспресс-анализа можно определить количественные значения характеристик модели (коэффициента структурной избыточности, неравномерности распределения по связям, структурной компактности, диаметра структуры и степени централизации), дающих возможность качественного определения степени устойчивости структуры АС АКУЧС.

Указанный подход к оценке устойчивости АС АКУЧС применён для анализа комплекса средств автоматизации НЦУКС МЧС России [5], результаты которого подтвердили достаточные уровни устойчивости, централизации управления и надёжности.

Краткой иллюстрацией проведения качественной оценки устойчивости может служить топологический экспресс-анализ "Системы-112" субъекта Российской Федерации [4, 6-10]. Модель упрощённой структуры "Системы-112" представлена в виде орграфа $T(V, R)$ на рис. 2, где:

- основной и резервный центры обработки вызовов показаны одной вершиной (основной центр выполняет обслуживание всех поступающих в "Систему-112" вызовов, резервный центр функционирует только при неисправности основного);

- все ДДС и подчинённые силы и средства показаны едиными вершинами, поскольку система передачи управленческих воздействий и результатов выполнения команд, функциональность аналогичных по типу объектов одинакова;

- на всех направлениях созданы резервированные системы связи и передачи данных.

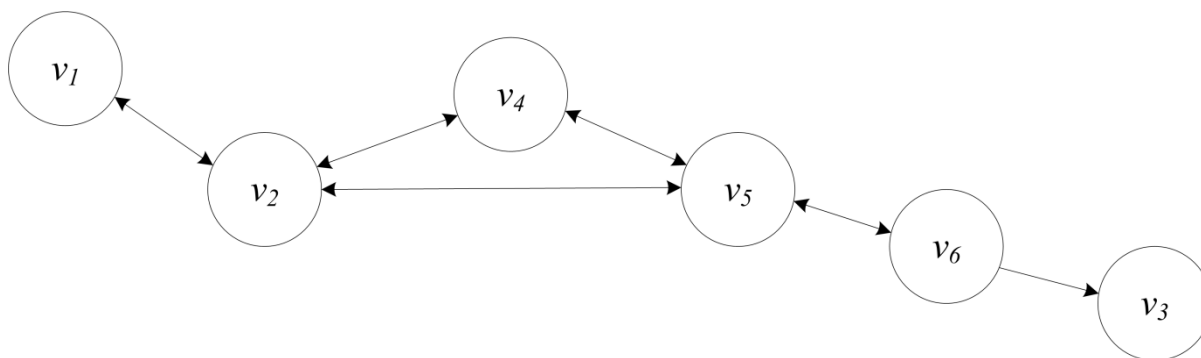


Рис. 2. Модель упрощённой структуры "Системы-112"

Характеристики вершин v_i орграфа $T(V, R)$:

- v_1 – руководящий центр операции (ЦУКС главного управления МЧС России по Республике Татарстан);

- v_2 – центр обработки вызовов системы-112;

- v_3 – зона происшествия (ЧС);

- v_4 – ЕДДС муниципальных образований;

- v_5 – ДДС;

- v_6 – силы и средства соответствующего подчинения (аварийно-восстановительные службы, экстренные оперативные службы и др.).

Матрица смежности A представлена в табл. 1, в последней строке представлены значения сумм элементов матрицы смежности A по каждому столбцу (значения v^k), а в последнем столбце – значения сумм элементов матрицы по каждой строке (значения v_k).

Таблица 1

Матрица смежности A орграфа $T(V, R)$

	1	2	3	4	5	6	v_k
1	0	1	0	0	0	0	1
2	1	0	0	1	1	0	3
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	2
5	0	1	0	1	0	1	3
6	0	0	1	0	1	0	2
v^k	1	3	1	2	3	1	

Основные пути прохождения сигналов в "Системе-112" Республики Татарстан:

- управление при ликвидации последствий ЧС – $v_1, v_2, v_6, v_7, v_6, v_2, v_1$ [ЦУКС главного управления МЧС России по Республике Татарстан → центр обработки вызовов "Системы-112" → привлекаемые ДДС → подчинённые силы и средства → привлекаемые ДДС → центр обработки вызовов "Системы-112" → ЦУКС главного управления МЧС России по Республике Татарстан];

- действия при поступлении сообщения о происшествии – v_2, v_6, v_7, v_3 [центр обработки вызовов "Системы-112" → привлекаемые ДДС → подчинённые силы и средства → реагирование на происшествие].

Число рёбер орграфа $m = 11$, а число вершин $n = 6$.

Структурная избыточность определяется по формуле (8): $\delta = 3,5$.

Для определения диаметра структуры необходимо построить матрицу расстояний D (табл. 2): $d = 4$.

Таблица 2

Матрица расстояний D орграфа $T(V, R)$

	1	2	3	4	5	6
1	0	1	4	2	2	3
2	1	0	3	1	1	2
3	0	0	0	0	0	0
4	2	1	3	0	1	2
5	2	1	2	1	0	1
6	3	2	1	2	1	0

По формулам (5) и (6) вычисляем для орграфа $T(V, R)$ показатели структурной компактности: $q = 45, q_o = 0,5$.

Для расчёта индекса центральности γ сначала по матрице смежности A определим значения степеней вершин орграфа $T(V, R)$: $v(1) = 2, v(2) = 6, v(3) = 1, v(4) = 4, v(5) = 6, v(6) = 2$ и, соответственно, $v_{\max} = 6$; затем по формуле (7) определим $\gamma = 0,6$.

По формулам (9) и (12) определим характеристики неравномерности распределения по связям орграфа $\sigma^2 \approx 21,3, \sigma_{\max}^2 = 32$ и $\sigma_o^2 \approx 0,67$.

По результатам топологического экспресс-анализа упрощённой структуры "Системы-112" можно сделать следующие выводы:

- коэффициент структурной избыточности $\delta = 3,5$, что свидетельствует о наличии избыточности по связям в структуре системы, и соответственно, о достаточной надёжности системы управления в целом;
- относительная неравномерность распределения по связям $\sigma_o^2 \approx 0,67$ свидетельствует о существенно различной загруженности элементов системы, наибольшую загруженность имеет элемент v_2 – центр обработки вызовов системы-112;
- относительная структурная компактность $q_o = 0,5 > 0$ характеризует наличие некоторой разобщённости по связям между элементами системы;
- диаметр структуры $d = 4$ соответствует максимальному пути [ЦУКС главного управления МЧС России по субъекту Российской Федерации → центр обработки вызовов "Системы-112" → ЕДДС муниципальных образований → ДДС → подчинённые силы и средства → реагирование на происшествие (ликвидация ЧС)];
- степень централизации $\gamma = 0,6$ свидетельствует о достаточно централизованном характере управления силами и средствами.

Литература

1. *ГОСТ 34.003-90*. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.
2. *Давыдов Г.Б., Рогинский В.Н., Толчан А.Я.* Сети электросвязи. М.: "Связь", 1977. 360 с.
3. *Денисов А.А., Колесников Д.Н.* Теория больших систем управления. Энергоиздат, 1982. 288 с.
4. *Грачев В.Л.* Модель для оценки эффективности автоматизированной системы управления в чрезвычайных ситуациях // Технологии техносферной безопасности. Вып. 4 (62). 2015. С. 172-181. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
5. *Отчётные материалы по научно-исследовательской работе "Комплексные исследования по оценке эффективности построения архитектуры автоматизированной системы антикризисного управления в системе МЧС России"*. М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2010. 207 с.
6. *Качанов С.А., Агеев С.В., Могильников С.А. и др.* Методические подходы обоснования создания системы обеспечения вызова экстренных оперативных служб по единому номеру "112" в Российской Федерации // Технологии гражданской безопасности. 2011. Т. 8. № 4. С. 10-14.
7. *Агеев С.В., Грачев В.Л., Ковтун О.Б.* Подходы к технико-экономическому обоснованию модернизации информационно-коммуникационной инфраструктуры системы-112 // Технологии гражданской безопасности. 2013. Т. 10. № 4. С. 22-27.
8. *Методические материалы по созданию системы-112 в субъектах Российской Федерации*. М.: МЧС России, 2013.
9. *Грачев В.Л.* Об оценке эффективности автоматизированных систем управления в чрезвычайных ситуациях // Технологии техносферной безопасности. Вып. 5 (57). 2014. <http://ipb.mos.ru/ttb>.
10. *Качанов С.А., Агеев С.В., Грачев В.Л.* Пути модернизации автоматизированной системы антикризисного управления МЧС России // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т. 12. № 3. С. 14-17.