

Управление

Д.А. Кононов, Н.Л. Лепе, Р.О. Пономарев

Управление чрезвычайными ситуациями в региональных системах методами ситуационного анализа

Рассмотрены возможности ситуационного анализа для управления безопасностью в региональных системах. Предложена иерархия понятий, вербальные и формальные постановки задач анализа уязвимости в условиях распространения возмущений при реализации угроз, а также классификация возникающих ситуаций. Предложена методика управления на основе прогнозирования критических и чрезвычайных ситуаций на графовой модели, разработаны вычислительные алгоритмы реализации предложенной методики.

Ключевые слова: сложные системы, региональные социально-экономические системы, чрезвычайная ситуация, ситуационный анализ.

Проведение исследования систем требует формализации целей и задач, построения определенной иерархии понятий, динамической модели функционирования объекта, расчета его характеристик, выделения свойств, экспертно значимых ситуаций и состояний.

В работах¹ были введены формальные модели стойкости, живучести и уязвимости сложных организационно-технических систем. В то же время в предыдущих работах не были исследованы проблемы управления безопасностью в региональных социально-экономических системах (далее – РСЭС), в том числе в кризисных условиях, а также вопросы прогнозирования наступления чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС).

В настоящей статье формализованы понятия, необходимые для проведения ситуационного анализа уязвимости региональной системы и превентивных способов выявления ЧС.

Иерархия понятий проблемы уязвимости в сложных системах

Исходным пунктом исследования, предлагаемого в настоящей работе, является концепция безопасности сложной системы, важными свойствами которой являются стойкость и живучесть. Каждое из этих свойств характеризует внутрисистемные связи и разнообразные взаимодействия ее с окружающей средой. Исследование перечисленных свойств позволяет уменьшить угрозу возникновения ЧС, приводящих к выходу из целевого режима функционирования (далее – ЦРФ), авариям и катастрофам в сложных системах.

Стойкость – системный параметр, характеризующий способность противостоять возмущениям, в том числе воздействиям, и функционировать в ЦРФ в условиях возникновения возмущений. Основной характеристикой стойкости системы служит время достижения системой предельного состояния безопасности. Под возмущением понимается реализация внешней или внутренней угрозы из множества предполагаемых угроз. Источником внутренней угрозы для региональной системы может являться любой потенциально опасный ее элемент. Внешняя угроза представляет собой угрозу, исходящую от объектов внешнего окружения системы.

Живучесть – системный параметр, свойство системы, характеризующее ее способность функционировать под влиянием воздействий, возникающих в процессе ее функционирования с учетом возможности восстановления ЦРФ. Живучесть учитывает возможность самовосстановления при реализации угрозы или управляемую восстанавливаемость поврежденных элементов во время кризисной ситуации. Живучесть системы не допускает перехода критической ситуации в ЧС, если обеспечено надлежащее управление. Стойкость и живучесть характеризуются значениями и структурой показателей компонент сложных систем, а также динамикой изменения системных элементов окружающей среды.

В рамках ситуационного анализа рассмотрим определения базовых ситуаций.

Кризисная ситуация – ситуация, при которой без надлежащего управления следует выход за пределы безопасности, при этом существует не единственный вариант управления, который сохраняет функционирование системы в пределах безопасности.

Критическая ситуация – состояние существенных параметров системы, при которой без надлежащего управления следует выход за пределы безопасности, при этом существует единственный вариант управления, который сохраняет функционирование системы в пределах безопасности.

Неконтролируемая ситуация – ситуация, когда при обнаружении выхода за пределы допустимости безопасности невозможно найти управленческие решения, позволяющие избежать чрезвычайной ситуации.

Чрезвычайная ситуация – состояние региональной системы, при котором нарушаются условия безопасности. В результате возникновения чрезвычайной ситуации на объекте, на определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде. Чрезвычайная ситуация характеризуется выходом целевых параметров за границу допустимости. ЧС классифицируют по различным параметрам.

По масштабам выделяют: межгосударственные, общегосударственные, региональные, местные, объектовые, технологические.

По времени, динамике развития и ликвидации последствий выделяют: стратегические ЧС, которые очень быстро приводят к катастрофическим последствиям большого масштаба; медленно развивающиеся ЧС; ЧС оперативного плана (аварии), последствия которых обычно носят локальный характер.

По виду нанесенного ущерба различают: с прямым и косвенным ущербом; представляющие угрозу жизни людей; приводящие к нарушению экологического равновесия; приводящие к уничтожению материальных ресурсов и т. п.

Для проведения превентивных мероприятий с целью прогнозирования возникновения ЧС необходимо исследовать систему на уязвимые места при реализации угроз.

Методика анализа кризисных ситуаций

Общетеоретическая модель ситуационного исследования кризисных ситуаций и поведения сложной системы в условиях ЧС для прикладного применения требует подробного описания основных элементов проблемной ситуации. Для реализации этой задачи следует провести комплекс работ:

- сформулировать проблему исследования;
- построить модель объекта;
- определить и формализовать экспертно-значимые события;
- определить и формализовать перечень угроз;
- формализовать характеристики объекта исследования;
- разработать программу вычислительного эксперимента;

- разработать алгоритмы и программы расчета характеристик;
- провести необходимые расчеты;
- сформулировать выводы анализа.

Предложим методику исследования анализа динамики целевых показателей региона в условиях кризиса.

I. Цели исследования:

- изучение характерных режимов синергического развития в виде множества базисных характеристик синергического развития;
- определение нежелательных явлений синергического развития;
- определение допустимых режимов синергического развития;
- определение допустимых импульсных воздействий для предотвращения нежелательных явлений синергического развития;
- определение допустимых характеристик аттрактивного развития;
- определение оптимальных характеристик аттрактивного развития.

II. Этапы сценарного анализа:

- построение общей графовой модели регионального развития;
- определение целевых показателей;
- определение угрожаемых вершин;
- расчет характеристик при реализации угроз;
- сравнение полученных характеристик;
- разработка рекомендаций.

III. Построение общей модели регионального развития.

Формирование стратифицированного описания базисных факторов целесообразно задать следующими направлениями (блоками):

а) социальные факторы: социальные программы, уровень цен, занятость, межэтническая напряженность и т. п.;

б) экономические факторы: технологический прогресс, производительность труда, макроэкономический риск, инвестиции, бюджет, объем денежной массы и т. п.;

в) интегральные экономические и социально-политические факторы: уровень жизни, внешние факторы развития, уровень теневой экономики и т. п.

Общая модель региона представляет собой набор факторов регионального развития (макропоказатели), а также связей между ними, определяющих специфику регионального состояния и развития. Результатом этапа является построение динамической модели развития региона на языке взвешенных ориентированных графов.

IV. Определение целевых и управляемых факторов регионального развития.

В качестве целевых факторов рассматривают важнейшие социально-экономические макропоказатели: уровень жизни населения, физический объем производства, квалификация работников и т. п. Требуется, чтобы значения этих факторов достигли определенного, достаточно высокого уровня и сохраняли свою стабильность в течение заданного времени.

В качестве управляемых базисных факторов, которые могут быть подвергнуты изменениям (импульсам), выделим возможность изменения внешних факторов развития посредством изменения внешних связей. В качестве угрожаемых компонент могут быть рассмотрены изменения в структуре отношений между базовыми показателями развития, т. е. изменения матрицы смежности орграфа.

V. Определение и расчет характеристик регионального развития.

В соответствии с целевыми установками исследования определяются реализуемые управленческие воздействия. Проводится расчет сценариев поведения РСЭС².

VI. Расчет и сравнительный анализ характеристик сценариев регионального развития.

Динамика развития факторов. Для моделирования процесса функционирования СС на орграфе оперирующая сторона располагает средствами регистрации значений мгновенного изменения значений $\delta I_j(t)$ параметров в j -й вершине графа, которые представляют собой возмущения или управления, реализованные в j -й вершине в момент времени t , т. е. регистрировать k -шаговый импульсный процесс возмущений (ИПВ) $\delta \mathbf{Im}(t, k) = (\delta I_j(t) 1 \leq j \leq n; t \leq \tau \leq k)$.

Состояния в операторных графах системы определяют соотношения:

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{z}(t-1) + \mathbf{Im}(t) \quad \text{при } t = 1, 2, \dots$$

или

$$\mathbf{Im}(t) = A(t-1)\mathbf{Im}(t-1) + \delta \mathbf{Im}(t) \quad \text{при } t = 1, 2, \dots$$

Здесь $\mathbf{z}(0) = \mathbf{z}^{(0)}$ – начальное, $\mathbf{z}(t)$ – текущее состояние системы; $\mathbf{z}(t-1)$ – расширенное состояние системы в момент времени $t-1$; $A(t-1)$ – матрица смежности в момент времени $t-1$; $\mathbf{Im}(t-1)$ – импульс, накопленный к моменту времени $(t-1)$, $\mathbf{Im}(0) = \delta \mathbf{Im}(0)$ – начальный импульс; $\delta \mathbf{Im}(t)$ – импульс в момент времени $t = 1, 2, \dots$

В рамках модели «Угроза-НШС» границы допустимости зададим для вектора целевых элементов $\delta \mathbf{a} = \{\delta_i, i \in Na \subseteq N\}$ из множества целевых элементов Na . Рассогласование между ЦРФ \mathbf{a} и текущим расширенным состоянием ОТС $\mathbf{z}(t)$ задается в виде условий: $\rho(\mathbf{z}(t) - \mathbf{a}) \leq \delta$ при $t = 1, 2, \dots$, где ρ – заданная метрика. В частности,

при задании границ допустимости $\delta(t) = \{\delta_i(t), i \in N\}$ при $t = 1, 2, \dots$, по каждому элементу системы временные границы стойкости системы по отношению к импульсным возмущениям должны удовлетворять условиям: $|z_i(t) - a_i| \leq \delta_i(t)$ при $t = 1, 2, \dots, i \in N$.

Выход величины значения параметра $z_j(t)$ за рамки условия $\mathbf{z}(t) \in Q(\mathbf{z}(t), t)$ при $t \in \Delta$ характеризует его i -элементную стойкость при реализации угрозы в i -м элементе. Для характеристики $T_{ij}^{(0)}(t_0)$ – «первый момент выхода значения параметра x_j за границу стойкости при реализации угрозы в i -м элементе» – может быть построена матрица T -шаговых угроз, то есть времени возникновения ЧС в элементе $x_j \in X$ при реализации угрозы $\gamma \in \Gamma^{(N, \infty)}$ в i -элементе в момент времени t_0 .

Потенциально-опасный объект – это вершина графа (целевая вершина), в которой значение параметра выходит за допустимые границы целевого режима функционирования, в результате чего она является источником реальной угрозы для всей системы.

Источник ЧС для сложной системы моделирует импульс $\delta \mathbf{Im}(\tau)$ (мгновенное изменение значений параметров), реализованный в момент времени τ .

В данном исследовании целью сценарного анализа является изучение функционирования системы под воздействием возмущений путем построения сценариев поведения системы и последующего их анализа по характеристике « T -шаговая угроза».

Результат возмущения $\mathbf{F}(\delta \mathbf{Im}(t, k), t)$ процесса реализации угроз $\delta \mathbf{Im}(t, k)$ в момент времени t может быть рассчитан в соответствии с теоремой – результат возмущения ЦРФ СС в момент времени t , соответствующий импульсному процессу $\delta \mathbf{Im}(t, k)$, равен $\mathbf{F}(\delta \mathbf{Im}(t, k), t) = \sum_{\tau=0}^t (A)^{t-\tau} \delta \mathbf{I}(\tau)$.

Аналитический расчет времени выхода вектора состояния системы за границы допустимости при известном возмущении в соответствии с этим результатом представляется проблематичным, поэтому необходимо проведение вычислительного эксперимента.

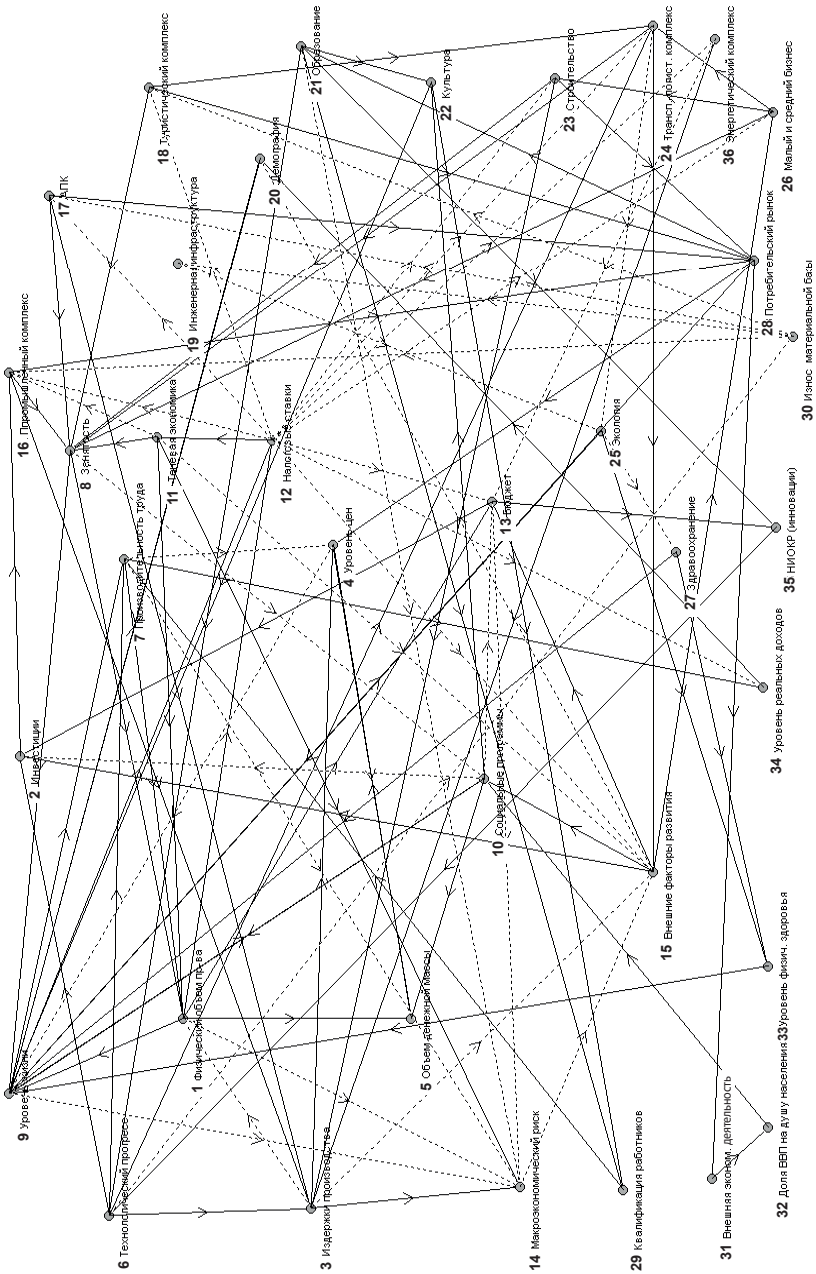
Численный эксперимент: анализ уязвимости Ивановской области

Графовая модель Ивановской области показана на рис. 1.

Рассмотрим варианты реализации угроз.

Сосредоточенные угрозы:

- исследуем сценарии поведения сложной системы при реализации единичной угрозы в управляемой вершине графа. Вычисляем матрицу T -шаговых угроз МТ-1;



- исследуем сценарии поведения сложной системы при реализации удвоенной угрозы в управляемой вершине графа. Вычисляем матрицу T -шаговых угроз МТ-2.

Распределенные угрозы в трех замкнутых контурах графа:

- единичная угроза реализуется последовательно в каждой вершине контура;
- удвоенная угроза реализуется последовательно в каждой вершине контура.

Вычисленные данные сводятся в матрицу T -шаговых угроз МТ-3.

Цель эксперимента – анализ матриц T -шаговых угроз, для каждой вершины определены шаги сценария выхода за ЦРФ и выявлены уязвимые места системы.

Для данного исследования разработаны следующие алгоритмы.

Алгоритмы построения характеристик и матрицы T -шаговых угроз

1. Алгоритм построения матрицы характеристик сценариев

Этап 1. Состоит из ввода данных пользователем:

- матрицы смежности A , построенной по заданному графу;
- начального состояния системы, которое представляет собой вектор $\mathbf{z}(0)$;
- вектора импульса возмущений $\delta \mathbf{Im}(\tau)$, который состоит из вектора столбца, соответствующего угрозам, реализованным в вершинах в момент времени τ ;
- заданного горизонта сценария;

Рис. 1. Модель Ивановской области

Модель Ивановской области включает 36 основных факторов: 1. Физический объем производства; 2. Инвестиции; 3. Издержки производства; 4. Уровень цен; 5. Объем денежной массы; 6. Технологический прогресс; 7. Производительность труда; 8. Занятость; 9. Уровень жизни; 10. Социальные программы; 11. Теневая экономика; 12. Налоговые ставки; 13. Бюджет; 14. Макроэкономический риск; 15. Внешние факторы развития; 16. Промышленный комплекс; 17. Аграрно-промышленный комплекс (АПК); 18. Туристический комплекс; 19. Инженерная инфраструктура; 20. Демографическое развитие; 21. Образование; 22. Культура; 23. Строительство; 24. Транспортно-логистический комплекс; 25. Экология; 26. Малый и средний бизнес; 27. Здравоохранение; 28. Потребительский рынок; 29. Квалификация работников; 30. Износ материальной базы; 31. Внешняя экономическая деятельность; 32. Доля ВВП на душу населения; 33. Уровень физического здоровья населения; 34. Уровень реальных доходов населения; 35. НИОКР; 36. Энергетический комплекс.

– целевого вектора \mathbf{a} , выбранного пользователем, как желательный вектор состояния эффективного функционирования системы;

– заданной границы допустимости δ .

Этап 2. Вычисление характеристик возмущения.

Этап 3. Вычисление характеристик поведения системы.

Этап 4. Формирование базы данных сценариев (БДС). База данных является трехмерным массивом сценариев, различающихся импульсами возмущения.

Этап 5. Построение матрицы характеристик. Характеристики отражают отклонение сценариев от заданного целевого направления в относительной и абсолютной шкале.

Этап 6. Формирование базы данных, которая представляет собой трехмерный массив, состоящий из матриц характеристик сценариев в зависимости от импульсов возмущений.

Этап 7. Разработка цикла в Matlab для построения сравнительных характеристик: нахождение максимального и минимального отклонений в абсолютной и относительной шкале, нахождение максимального и минимального отклонений от целевого направления для экспертно-значимых элементов и для всей системы в целом.

Этап 8. Визуализация выводных данных в виде таблиц или диаграмм.

2. Алгоритм построения матрицы T -шаговых угроз

Учитываются только те элементы, значения которых выходят за допустимые пределы на заданном горизонте сценария.

Этап 1. На данном этапе осуществляется выбор матрицы из БД матриц характеристик сценариев, которая соответствует определенной угрозе.

Этап 2. Разработка цикла в Matlab для поиска первого выхода за границы ЦРФ (конкретное значение каждого экспертно значимого элемента сравнивается с предельно допустимым значением для ЦРФ).

Этап 3. Формирование столбцов матрицы T -шаговых угроз, каждый из которых соответствует первому выходу значений в вершинах графа за предельно допустимые значения при реализации угрозы.

Этап 4. Формирование всех полученных столбцов в общую матрицу T -шаговых угроз.

Этап 5. Вывод данных – матрица T -шаговых угроз в виде таблицы.

Результаты вычислительного эксперимента

Исходные данные для расчета – это целевые вершины: 8. «Занятость»; 9. «Уровень жизни»; 13. «Бюджет»; 25. «Экология»; 27. «Здравоохранение», в качестве угрожаемых вершин выберем: 2. «Инвестиции»; 6. «Технологический прогресс»; 11. «Теневая экономика»; 18. «Туристический комплекс»; 24. «Транспортно-логистический комплекс»; 36. «Энергетический комплекс».

Зададим допустимые отклонения целевого вектора 5% – по вершинам графа «Занятость», «Уровень жизни» и «Здравоохранение», 25% – по вершинам «Бюджет» и «Экология».

Исследуем влияние на граф «Ивановская область» сосредоточенных угроз.

Единичная угроза

Для построения матрицы T -шаговых угроз начальный импульс $Im(i)(0) = \{Im_i(0) = -1, Im_j(0) = 0 \text{ при } j \neq i\}$, представляющий единичную угрозу, реализуется последовательно в каждой управляемой вершине, кроме вершины «Теневая экономика» (начальный импульс $Im(i)(0) = \{Im_i(0) = 1, Im_j(0) = 0 \text{ при } j \neq i\}$). Сценарий $C1(2)$ -1 соответствует угрозе $Im_1(0) = -1$, реализованной в вершине «Инвестиции».

Аналогично построены сценарии $C2(6)$ -1 ... $C6(36)$ -1. Результатом является матрица MT -1 T -шаговых угроз.

Таблица 1

Матрица T -шаговых угроз (MT -1)

Вершина	$C1(2)$ -1	$C2(6)$ -1	$C3(11)$ -1	$C4(18)$ -1	$C5(24)$ -1	$C6(36)$ -1
8	5	9	50	50	50	50
9	50	10	50	50	50	50
13	9	9	14	11	10	14
25	9	13	10	10	9	12
27	50	50	50	50	50	50

Начальная угроза, реализованная в каждой из вершин, изменяет состояние этого элемента на нескольких шагах сценария. По матрице T -шаговых угроз определяем, что реализация угрозы «Инвестиции» негативно влияет на вершину «Занятость» на пятом шаге сценария $C1(2)$ -1.

Удвоенная угроза

Для построения матрицы T -шаговых угроз начальный импульс $\text{Im}(i)(0) = \{\text{Im}i(0) = -2, \text{Im}j(0) = 0 \text{ при } j \neq i\}$, представляющий угрозу, реализуется последовательно в каждой вершине, кроме вершины «Теневая экономика» (начальный импульс $\text{Im}(i)(0) = \{\text{Im}i(0) = 2, \text{Im}j(0) = 0 \text{ при } j \neq i\}$). Сценарий С1(2)-2 соответствует угрозе $\text{Im}1(0) = -2$, реализованной в вершине «Инвестиции».

Аналогично построены сценарии С2(6)-2 ... С6(36)-2. Результатом является матрица МТ-2 T -шаговых угроз.

Таблица 2

Матрица T -шаговых угроз (МТ-2)

Вершина	С1(2)-2	С2(6)-2	С3(11)-2	С4(18)-2	С5(24)-2	С6(36)-2
8	50	6	50	50	50	50
9	50	50	50	50	50	50
13	7	8	12	9	10	12
25	8	13	9	9	9	9
27	50	6	50	50	50	50

По матрице T -шаговых угроз определяем, что реализация угрозы «Технологический прогресс» негативно влияет на вершину «Занятость» и «Здравоохранение» на шестом шаге сценария С1(6)-2.

Исследуем влияние на функционирование Ивановской области распределенных угроз по замкнутому контуру, рассредоточенных по шагам.

Рассмотрим построение матрицы T -шаговых угроз для системных элементов модели – замкнутых контуров попарных связей. Для построения матрицы T -шаговых угроз (МТ-3) системный элемент модели представляет собой замкнутый контур попарных связей. Построим матрицу T -шаговых угроз при реализации угрозы в каждом элементе контура.

В графе «Ивановская область» выбраны три контура:

– 1К (вершины «Уровень жизни» – «Макроэкономический риск» – «Внешние факторы развития» – «Социальные программы»);

– 2К (вершины «Инвестиции» – «Промышленный комплекс» – «Занятость» – «Физический объем производства» – «Бюджет»);

– 3К (вершины «Экология» – «Здравоохранение» – «Уровень жизни» – «Налоговые ставки» – «Транспортно-логистический комплекс»).

Сценарии последовательной реализации угроз

Для контура 1К строится сценарий С1К1 при реализации единичной угрозы в вершине «Уровень жизни» на первом шаге ($t_1 = 1$), в вершине «Макроэкономический риск» на втором шаге ($t_2 = 2$), в вершине «Внешние факторы развития» на третьем шаге ($t_3 = 3$), в вершине «Социальные программы» на четвертом шаге ($t_4 = 4$). Аналогично построены сценарии С2К1, С3К1.

Для контура 1К строится сценарий С1К2 при реализации удвоенной угрозы в вершине «Уровень жизни» на первом шаге ($t_1 = 1$), в вершине «Макроэкономический риск» на втором шаге ($t_2 = 2$), в вершине «Внешние факторы развития» на третьем шаге ($t_3 = 3$), в вершине «Социальные программы» на четвертом шаге ($t_4 = 4$). Аналогично построены сценарии С2К2, С3К2.

По полученным расчетам строится матрица T -шаговых угроз МТ-3.

Таблица 3

Матрица T -шаговых угроз (МТ-3)

Вершина	С1К1	С2К1	С3К1	С1К2	С2К2	С3К2
8	50	50	50	9	50	50
9	50	50	50	6	50	50
13	10	9	9	50	12	12
25	9	8	9	50	10	9
27	50	50	50	7	50	50

Реализация удвоенных угроз в первом контуре оказывает отрицательное влияние на вершины «Занятость», «Уровень жизни» и «Здравоохранение». Реализация удвоенных и единичных угроз в рассматриваемых контурах, кроме контура С1К2, значительно уменьшает значение в вершинах «Бюджет» и «Экология».

Результаты вычислительного эксперимента показывают:

– нет прямо пропорциональной зависимости для времени выхода за пределы допустимых значений вектора состояния системы при реализации единичной и удвоенной угрозы;

– не наблюдается на заданном горизонте сценария для ряда вершин отклонения значений от выбранных границ целевого вектора;

– значительно ухудшается вершина «Экология» при реализации удвоенной отрицательной угрозы в вершине «Инвестиции» и при реализации единичной угрозы по вершинам второго контура;

– система наиболее устойчива к удвоенным угрозам, реализованным во втором контуре;

– система наименее устойчива к удвоенным угрозам, реализованным в первом контуре.

В качестве направлений дальнейших исследований обозначим выявление узлов уязвимости структуры системы, формальный анализ причин возникновения чрезвычайной ситуации (продолжительности и наносимого ущерба) и разработку эффективных превентивных мероприятий по предотвращению ЧС, а также оптимальные методы ликвидации последствий.

Примечания

- ¹ Кононов Д.А., Швецов Д.А., Пономарев Н.О., Пономарев Р.О. Сценарное исследование уязвимости сложных организационно-технических систем // Труды НИИИСИ РАН М., 2014. С. 61–68; Кононов Д.А., Сомов Д.С. Сценарный подход при анализе систем безопасности на железнодорожном транспорте // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: Сб. докл. Российской конф. с междунар. участием. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 1199–1202.
- ² Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: В 2 кн. / Под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы. М.: Наука, 2012.
- ³ Кульба В.В., Кононов Д.А., Чернов И.В., Роцин П.Е., Шулигина О.А. Сценарное исследование сложных систем: Анализ методов группового управления // Управление большими системами: Спец. выпуск 30.1: «Сетевые модели в управлении». М.: ИПУ РАН, 2010. С. 154–186.