

прогнозирования в космической отрасли. – М.: ИПУ РАН, 2016. – 148 с.

3. *Морозов С.И., Смирнов Е.Б.* Проблемы научного обеспечения стратегического планирования социально-экономического развития региона // Проблемы современной экономики. – 2011. – №3 (39). – С. 188-191.

4. *Chernov I.V.* Scenario Analysis of Vulnerability in Control of Complex Systems // Automation and Remote Control. – 2022. – Vol. 83. № 5. – P. 780-791.

DOI: 10.25728/iccss.2023.43.90.006

Горелова Г.В.

Об анализе связности структур сложных систем на когнитивных моделях

Аннотация: Исследуется важный признак сложных систем – связность их взаимодействующих элементов на имитационных моделях в виде когнитивных карт. Используется теория q -анализа связности, которая реализована в авторской программной системе когнитивного моделирования сложных систем (CMCS). Приведен иллюстрационный пример анализа структуры когнитивной карты взаимоотношения двух регионов, направленного на повышения качества жизни.

Ключевые слова: сложная система, когнитивная карта, связность, полиэдральный анализ, симплекс, качество жизни

В работе рассматриваются вопросы когнитивного имитационного моделирования сложных систем, включающего этап анализа структурных свойств системы, отображенной когнитивной моделью. Среди таких свойств важнейшим является свойство связности элементов - без связности нет системы. Анализ связности сложной социально-экономической, социотехнической, политической и т.п. системы направлен также на выявление существенных, функционально-значимых связей системы.

Как известно, когнитивная модель является графом с вершинами V и дугами E :

$$G = \langle V, E \rangle, V = \{v_i, v_j\}, E = \{e_{ij}\}, i, j = 1, 2 \dots k. \quad (1)$$

Матрица смежности графа: $A_G = [a_{ij}]$.

К исследованию структуры модели применяется теория графов, но определение чисел связности, разреза графа, выделение подграфов, частичных графов и т.п. дают возможность взглянуть на систему только с одной стороны. Возникает проблема исследования структуры системы как на глобальном уровне, с позиций структуры, как единого целого, так и на локальных уровнях с позиций отдельных подсистем и элементов. Для этих целей применяется аппарат алгебраической топологии, теории групп, теории множеств и бинарных отношений, позволяющий проводить анализ структуры как сложного многомерного геометрического образования – симплициального комплекса [1-3]. К. Дроукером был разработан первый математический инструмент симплициального анализа, названный им q – анализом, который позднее и был использован в исследованиях социально-экономических систем [1, 2].

В нашем дальнейшем изложении частично воспользуемся текстом [4]. Методика анализа q – связности (полиэдральный анализ) позволяет судить о связности системы более глубоко, нежели традиционные исследования связности графа, поскольку при этом устанавливается наличие взаимовлияния симплициальных блоков системы через цепочку связей между ними. На основании таких возможностей предлагаются формализованные правила обоснования выбора целевых и управляющих вершин, определение устойчивости систем, характеризуемых теми или иными симплициальными комплексами, условия структурной устойчивости систем. Определение числа симплексов и их структуры, анализ q – связности системы позволяют выдвигать обоснования для решения задач декомпозиции и композиции изучаемой сложной системы, выявлять симплексы, более всего влияющие на процессы в системе и образующие вершины которых рациональнее выбирать в качестве управляющих.

Q – анализ связности позволяет раскрыть многомерную геометрию сложных систем, проследить влияние различных локальных изменений на структуру системы в целом, остановить внимание именно на структурных особенностях системы, что не

выявляется при других подходах. Использование этого метода для анализа структурно-сложных систем позволяет по-другому подойти к самому определению понятия «сложность», более глубоко вскрыть роль отдельных элементов и их влияние на остальные элементы системы.

В полиэдральном анализе система рассматривается в виде отношения между элементами конечных множеств – множества вершин V и заданного семейства непустых подмножеств этих вершин – симплексов σ . Множества вершин и соответствующих им симплексов образуют симплициальные комплексы Q . Для их построения используется структура системы, заданная в виде графа (1). Структура системы служит основанием для геометрического и алгебраического ее представления, как симплициального комплекса. Любое отношение λ в системе представляется таким образом, что множество элементов, относимых к конкретному элементу v_i (вершине, концепту графа), трактуется как симплекс $\sigma^{(i)}$, а их совокупность образует симплициальный комплекс Q .

Для корректного осуществления перехода от структуры системы G к ее симплициальному представлению K , что является ключевым моментом в полиэдральном (симплициальном) анализе, эксперту (исследователю, аналитику) необходимо задать множество вершин V симплициального комплекса $V = \{X, Y\}$ и определить некоторое отношение или правило, согласно которому исходное множество вершин будет разбито на множество непустых пересекающихся подмножеств – симплексов. Формальный переход от структуры системы, заданной в форме графовой модели, к ее модели в виде симплициального комплекса не составляет труда. Рассмотрим основные понятия и определения, связанные с симплициальными комплексами.

Если для конкретных целей полиэдрального анализа сложной системы достаточно изучения отношений в модели G , т.е. набор отношений a_{ij} (матрица A_G) можно считать соответствующим набору отношений λ_{ij} , интересующих исследователя, то структура модели Λ , исследуемой методом полиэдрального анализа, задается тем же графом G и $\forall \lambda_{ij} = a_{ij}, A_G = \Lambda_G = [\lambda_{ij}]$.

Граф отражает непосредственное влияние переменных x_i на y_j в соответствующих вершинах матрицы $\Lambda = [\lambda_{ij}]$, взаимодействие

между элементами (подсистемами) x_i и y_j будет определяться недиагональными элементами матрицы. Поэтому анализ связности структуры должен сосредотачиваться на изучении степени заполненности матрицы Λ и значимости ее элементов. С этих позиций понятие связности системы является алгебраическим понятием, хотя для понимания связности структуры необходимо привлекать не только алгебру, но и топологию. В системе S существуют более глубокие структурные связи, которые можно вскрыть, анализируя отношение $\Lambda = [\lambda_{ij}]$, которое с геометрической точки зрения симплициальный комплекс.

Симплекс обозначим $\delta^{(i)}_q$, где i – номер вершины, а q – геометрическая размерность симплекса. Число q определяется числом дуг, соединяющих вершины y_j в симплексе через переменную x_i . Число q (число дуг, инцидентных y_j) на единицу меньше числа единиц («1») в соответствующей i -строке матрицы Λ .

Симплексы модели в совокупности образуют семейство – симплициальные комплексы Q . Это симплексы, которые соединены посредством общих граней (в том числе – общей вершиной – точкой). Характеристикой связности может служить размерность грани, общей двум симплексам. Но поскольку существует комплекс как целое, то для анализа связности используется понятие «цепь связи».

Цепь связи (q -связность) отражает возможность того, что два симплекса, непосредственно не имея общей грани, могут быть связаны при помощи последовательности промежуточных симплексов.

Не останавливаясь далее на теории q -связности [1-4], проиллюстрируем ее применение на конкретном примере.

На рисунке 1 изображен один из вариантов когнитивной карты взаимоотношения двух регионов, направленного на повышение качества жизни населения [6].

Когнитивное моделирование, проводимое с помощью программной системы когнитивного моделирования сложных систем (CMCS) [7], производится поэтапно. Основные из них это [4-6]: разработка когнитивной модели, анализ свойств модели, сценарное моделирование (импульсное моделирование для предвидения возможного развития ситуаций в системе).

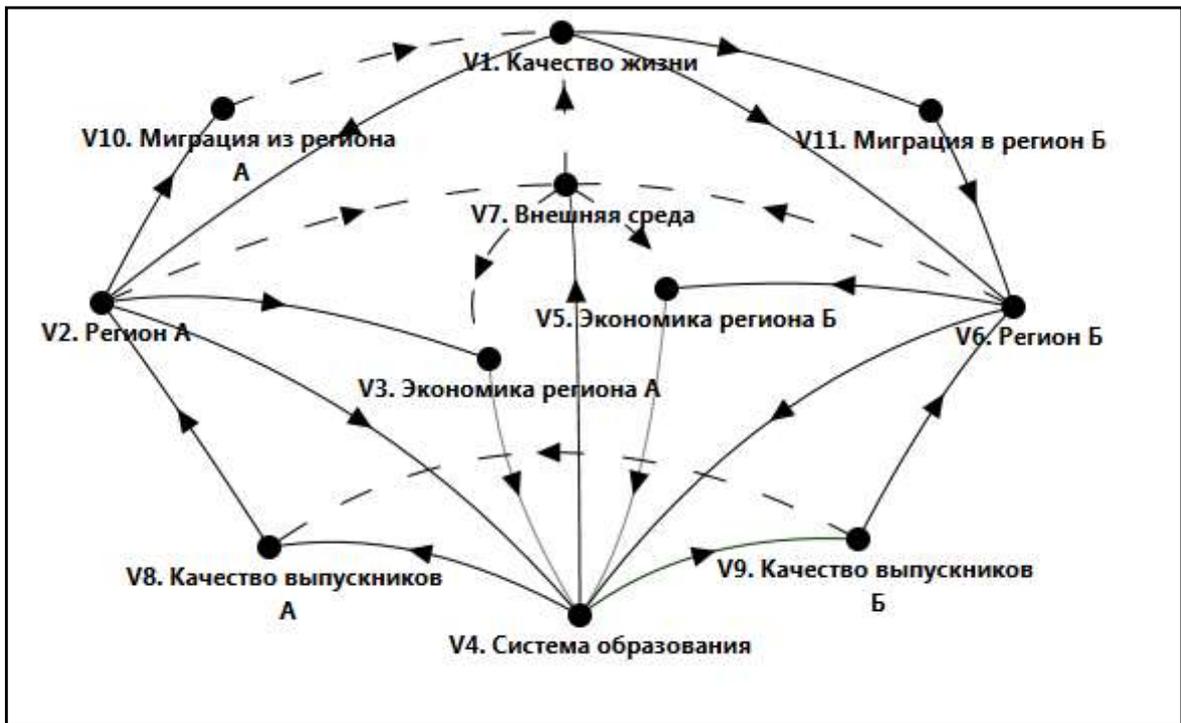


Рисунок 1 – Когнитивная карта G «Качество жизни»

На рисунке 2 изображены результаты анализа циклов в структуре когнитивной карты (Этап 2).

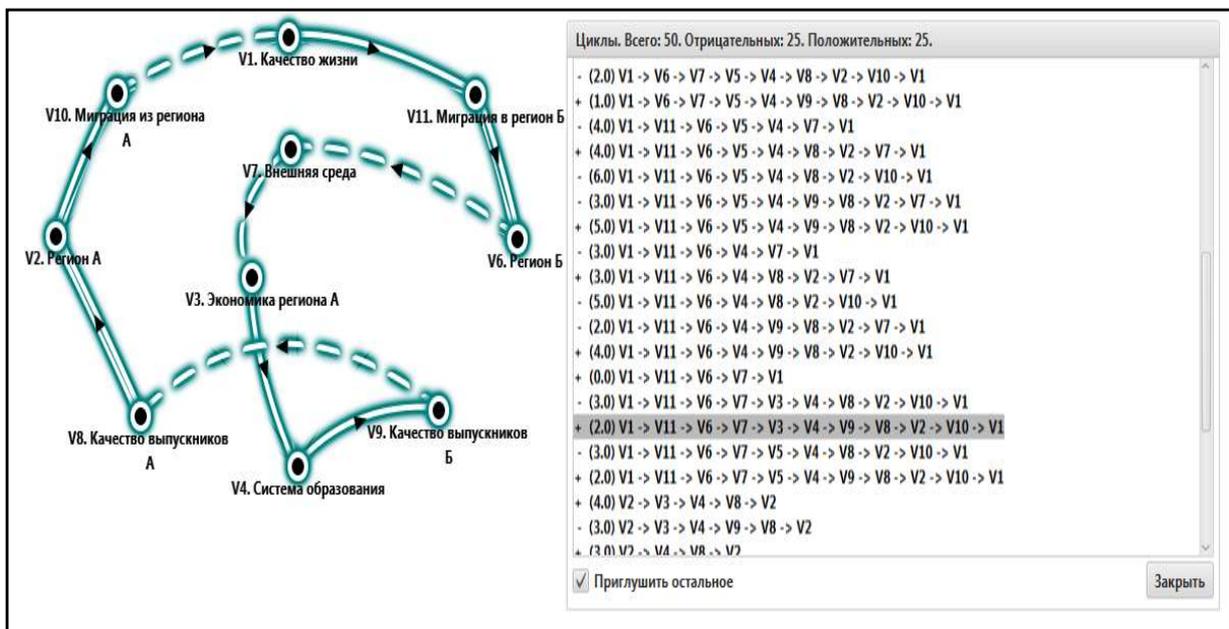


Рисунок 2 – Выделение одного из положительных циклов обратной связи в модели G

В системе имеется 50 циклов положительной и обратной связей. Нечетное число отрицательных циклов (25) свидетельствует о структурной устойчивости системы [4, 5].

На рисунке 3 представлены результаты q-анализа с выделенным симплексом $\sigma^{(2)}_3$ вершины V_2 (множество X, строки матрицы).

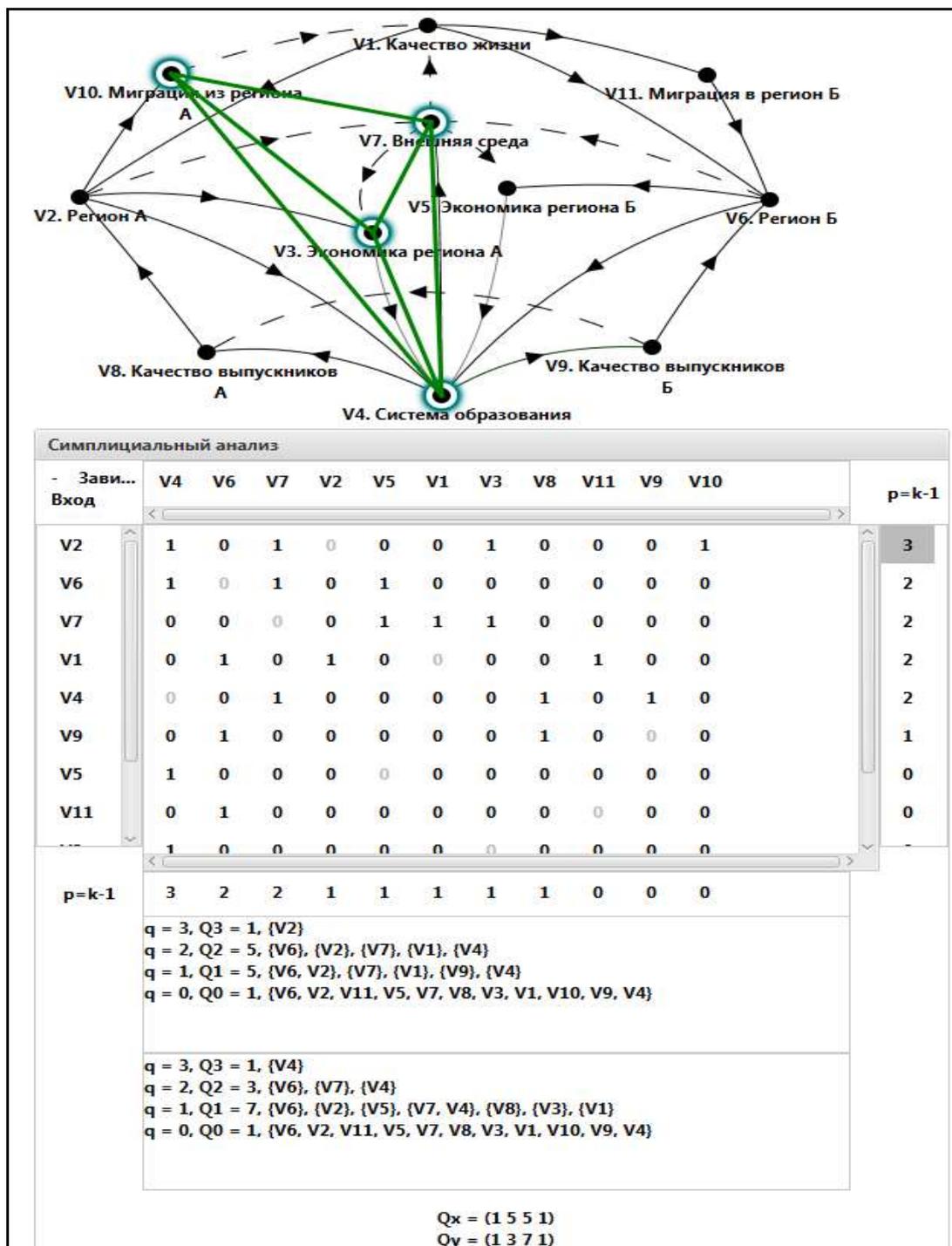


Рисунок 3 – Результаты q-анализа

Симплекс $\sigma^{(2)}_3$ образован вершиной V_2 «Регион А», которую можно интерпретировать как «причину» связи вершин V_3, V_4, V_7, V_{10} .

На рисунке 4 изображен симплициальный комплекс Q_x .

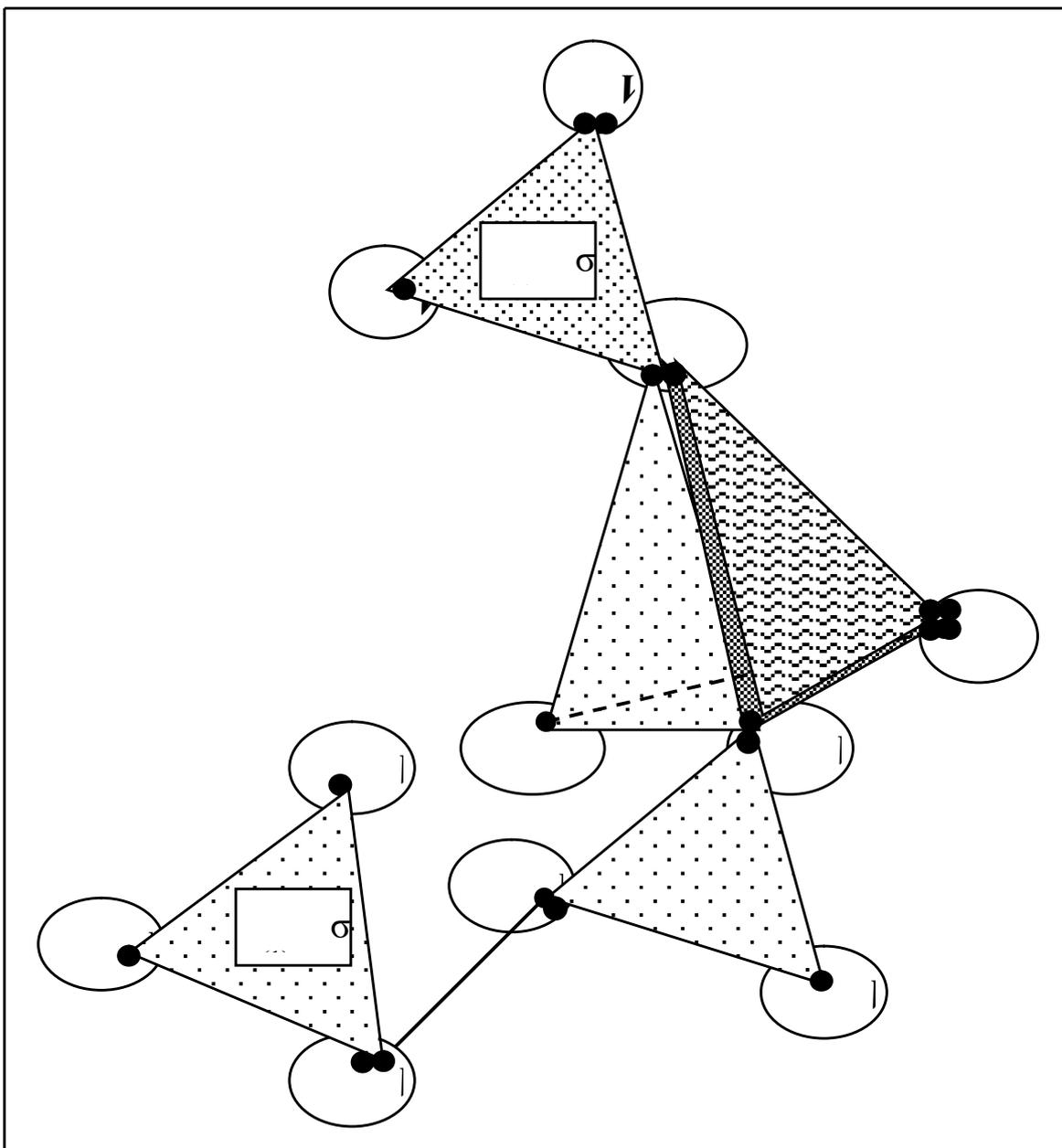


Рисунок 4 – Изображение симплициального комплекса K_x

На рисунке 5 изображен один из возможных сценариев развития ситуаций (Этап 3), полученный при внесении возмущающих импульсов в 4 вершины симплекса $\sigma^{(2)}_3$.

В тексте данной статьи не приводится интерпретация полученных результатов когнитивного моделирования, но можно добавить, что их анализ позволил разработать более содержательные модели, например, [6].

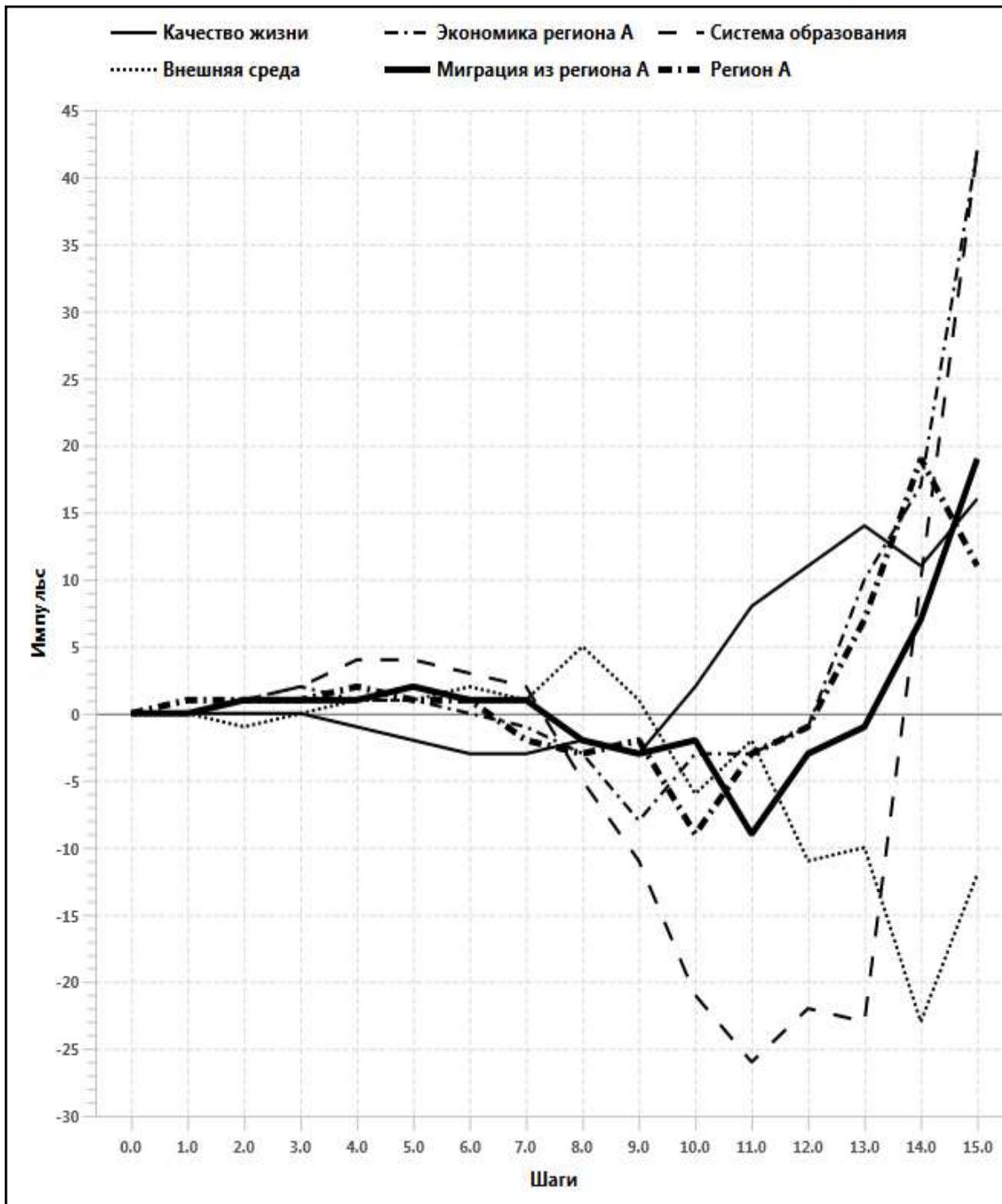


Рисунок 5 – Графики импульсных процессов при внесении возмущающих воздействий в вершины симплекса $\sigma_3^{(2)}$

Литература:

1. *Atkin R.H.* Combinatorial Connectivities in Social Systems. An Application of Simplicial Complex Structures to the Study of Large Organisations. – Birkhäuser Basel, 1977. – 245 p.

2. *Atkin R.H., Casti J.* Polyhedral Dynamics and the Geometry of Systems. RR-77-International Institute for Applied Systems Analysis. – Laxenburg, Austria. – March, 1977. – 36 p. – URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/709/1/RR-77-006.pdf> (дата обращения 10.10.2023).

3. *Касту Дж.* Большие системы: связность, сложность и катастрофы. – М.: Мир, 1982. – 216 с.

4. *Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.А.* Исследование слабоструктурированных проблем социально-экономических систем: когнитивный подход. – Ростов н/Д: Изд-во РГУ, 2006. – 332 с.

5. *Galina V. Gorelova.* Cognitive Modeling of Complex Systems: State and Prospects / In: Vasiliev Y.S., Pankratova N.D., Volkova V.N., Shipunova O.D., Lyabakh N.N. (eds) System Analysis in Engineering and Control. SAEC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. – Volume 442. – Springer Nature Switzerland AG, 2022. – P. 212-224.

6. *Firsova A., Gorelova G., Makarova E.L., Makarova E.A., Chernyshova G.* Simulation Cognitive Modeling Approach to the Regional Sustainable Complex System Development for Improving Quality of Life // *Mathematics*. – 2023. – Volume 11. Issue 20. – 4369. – DOI: 10.3390/math11204369.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018661506. Программа для когнитивного моделирования и анализа социально-экономических систем регионального уровня. Авторы: Горелова Г.В., Калиниченко А.И., Кузьминов А.Н. – 07.09.2018.

DOI: 10.25728/iccss.2023.19.92.007

Куклев Е.А.

Модель «Спящей катастрофы Ризона» в качестве элемента СУБП в гражданской авиации

Аннотация: Предлагаются принципы и способ построения системы управления безопасностью полетов