

Моделирование сложных технических систем на основе гиперграфов для определения взаимодействий агентов

Е.Р. Зяблова ¹✉¹ Южный федеральный университет, г. Таганрог, 347900, Россия

Ссылка для цитирования

Зяблова Е.Р. Моделирование сложных технических систем на основе гиперграфов для определения взаимодействий агентов // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38. № 4. С. 588–597. doi: 10.15827/0236-235X.152.588-597

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.8

Поступила в редакцию: 01.07.2025

После доработки: 04.07.2025

Принята к публикации: 24.07.2025

Аннотация. В работе отмечается целесообразность использования ГН-графов и ГН-гиперграфов для моделирования сложных технических систем. Приводится описание программного комплекса моделирования взаимодействия объектов сложных систем с использованием языка Python. Программный комплекс содержит модули динамической визуализации графовой модели на основе графа и вычисления характеристик графа, модули реализации алгоритмов пропорционального разделения графа и поиска кратчайших путей. Для представления графовых структур применяется формат JSON. Данная статья является развитием предыдущих работ автора, где ГН-граф определен как нечеткий граф с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями. К преимуществам ГН-графа относятся возможность представления разнотипных отношений в сложных системах и уменьшение времени вычисления ряда характеристик за счет использования множественных связей в виде вектора, позволяющих объединить разнотипные связи. Предложена модификация ГН-гиперграфа, которая заключается в интеграции ГН-графа в гиперграф; ГН-гиперграф обладает преимуществами ГН-графа и дополнительно допускает использование разнотипных гиперребер и множественных разнотипных связей между вершиной и гиперребром. Это позволяет представить объекты (группы объектов) разных типов, разнотипные отношения между объектом и группой объектов системы и уменьшить время анализа системы. На примере заданной системы охраны протяженного периметра показаны возможности моделирования взаимодействия объектов на основе ГН-графов и ГН-гиперграфов. В качестве практического примера рассматривается решение задачи формирования зон влияния объектов системы. Метод решения включает этапы моделирования системы и вычисления метрик ГН-модели и/или ее частей. Результаты экспериментов показали уменьшение времени вычисления метрик таких моделей размерностью до 1 000 вершин не менее чем в 1,3 раза по сравнению с моделями, допускающими только разнотипные связи между вершинами. Развитие предложенного метода возможно за счет решения задач классификации и прогнозирования с использованием предсказательных моделей на основе объяснимых графовых или гиперграфовых нейронных сетей.

Ключевые слова: моделирование, сложные технические системы, нечеткий граф, программный комплекс, разнотипные вершины, графовые и гиперграфовые нейронные сети, ГН-граф, ГН-гиперграф

Введение. Исследователи проявляют значительный интерес к задаче моделирования *сложных технических систем* (СТС). Ведется поиск средств моделирования, наиболее подходящих для решения того или иного класса задач, выполняется модификация моделей. Для моделирования СТС используются различные подходы, в том числе основанные на применении когнитивных и интеллектуальных моделей, графов и их обобщений, например метаграфов, гиперграфов.

Так, в работе [1] авторы обобщают основные результаты в создании интеллектуальных средств и технических решений для интеллектуальной защиты сложных организационно-технических систем: анализ информационно-управляющих систем и формирование информационных ресурсов, интеллектуальные системы комплексной защиты информации, построение сложных реляционных баз данных, разработка

безопасного ПО, нечеткое моделирование и обучение нейро-нечетких моделей. В работе [2] рассматриваются вопросы гибридации интеллектуальных моделей применительно к задаче моделирования и управления рисками в сложных организационно-технических системах. В работах [3–5] предлагается использование комплексов различных методов в совокупности с когнитивными моделями для решения ряда задач в сложных слабоформализуемых системах: для исследования модельной природно-технической системы, связанной с определением устойчивости объектов инфраструктуры, построенных на многолетнемерзлых грунтах [3], для решения задачи многомерного прогнозирования устойчивости городской среды г. Москвы [4], для обеспечения безопасности организационно-технической системы при гипотетических изменениях управляющих и возмущающих воздействий на систему [5].

Ряд исследователей предлагают использование графов и гиперграфов с однотипными связями для решения практических задач в СТС, например, для оценки показателя эффективности комплекса технических средств системы охраны объектов [6] (предложено использование многоуровневого ориентированного графа), для анализа механических структур СТС [7] и для решения задачи оптимизации производительности сетей в гражданской авиации [8] предложена модель, объединяющая гиперграф и неориентированный граф.

Перечисленные модели нередко используют графовую структуру. Среди подходов с применением методов ИИ можно выделить методы, использующие графовые и ГН-графовые нейронные сети [9, 10]. Когнитивную модель системы упрощенно можно представить в виде ориентированного графа, в котором вершины соответствуют состояниям системы, а дуги – причинно-следственным связям. На основании изложенного сделан вывод о целесообразности использования графовых подходов для моделирования процесса взаимодействия объектов СТС.

Развитие теории графов привело к появлению моделей, позволяющих представить разнотипные отношения в сложных системах. В работе [11] предложен граф, в котором вершины представляют объекты системы, а разнотипные связи – разнотипные отношения в системе. Однако наличие таких связей между вершинами графа может привести к резкому увеличению времени вычисления на графах для решения NP-полных задач, например, в случае применения алгоритмов поиска кратчайших путей и др.

Так, например, в работе [12] для моделирования процесса взаимодействия объектов СТС обусловлено использование нечетких графов с множественными разнотипными связями. Отличие данной графовой модели от предложенной исследователями ранее заключается в использовании множественных связей в виде вектора. Они позволяют объединить ряд разнотипных связей. Это позволяет снизить время работы некоторых алгоритмов, выполняющих обходы графа. Так, в работе [12] показано уменьшение временных затрат на формирование матрицы расстояний для графов размерностью до 1 000 вершин не менее чем в 1,3 раза по сравнению с графами, допускающими только разнотипные связи.

Применение нечетких графов с множественными разнотипными связями для моделирования взаимодействия объектов СТС рас-

смотрено в ряде работ на примерах различных систем:

- для моделирования взаимодействий объектов системы охраны [12];

- для использования в качестве графа знаний при разработке онтологии сложной много-связной динамической предметной/проблемной области [13];

- для анализа структурных характеристик в распределенных вычислительных системах [14].

В более поздних исследованиях предложена модификация такого графа за счет учета разнотипности вершин [15]. Все это подтверждает эффективность и предпочтительность использования на практике нечетких графов с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями для моделирования взаимодействия объектов сложных систем.

В то же время при моделировании сложных систем может возникнуть необходимость в исследовании поведения не только отдельного объекта, но и групп. В этом случае целесообразно использование моделей на основе гиперграфов.

Известно, что гиперграф – это обобщенный граф, в котором любое подмножество вершин может быть связано ребром [8]. В теории гиперграфов такое ребро называется гиперребром.

Неориентированные гиперграфы, заданные множествами вершин и гиперребер, и ориентированные гиперграфы, заданные множествами вершин, гиперребер и связей между вершинами, рассматриваются в [16], исследователи предложили подход по объединению моделей на основе нечеткого графа с множественными разнотипными связями и неориентированного гиперграфа. Такая модель, получив название «нечеткий гиперграф с множественными разнотипными связями», задана множествами вершин, ребер между вершинами, гиперребер, ребер между вершинами и гиперребрами.

Аббревиатура «ГН» предложена в работе [17] и фактически предлагает интеграцию элементов графов в гиперграфы (*Graph-Hypergraph*). Тогда графы с разнотипными вершинами и множественными разнотипными связями далее будем называть ГН-графами, а гиперграфы, учитывающие связи ГН-графа, а также гиперребра и связи между вершинами и группами вершин – ГН-гиперграфами, в общем случае – ГН-моделями.

Моделирование СТС на основе ГН-графа

Продемонстрируем возможности моделирования СТС при помощи ГН-моделей на при-

мере системы охраны объектов протяженного периметра.

Объекты системы охраны являются разнотипными, к ним относятся:

- ОО – мобильные или стационарные объекты охраны, находящиеся на территории;
- ОПО – опорные точки (группы опорных точек) объектов охраны;
- А – агенты (роботизированные платформы) для сбора данных об объектах охраны;
- ПН – потенциальные нарушители охраняемой территории;
- ЛПР – лицо, принимающее решение (компьютер), обрабатывающее информацию о состоянии объектов охраны и возможных проникновениях на территорию.

Между объектами и их группами системы охраны существуют разнотипные отношения, например, удаленность, управление движением, передача данных и др.

В работе [15] формально ГН-граф $G = (Gv, Ge)$ задан нечеткими конечными множествами вершин $Gv = \{gv_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ и связей между ними $Ge = \{ge_l | l = 1, 2, \dots, m\}$.

Множество вершин ГН-графа содержит подмножества вершин по типам: $Gv = \{Gv(tpv_p)\}$.

Множество связей ГН-графа содержит подмножества разнотипных связей $Ge(tp_k)$ и связей в виде вектора $Ge(v_e)$, позволяющих объединить несколько разнотипных: $Ge = \{Ge(tp_k), Ge(v_e)\}$. Связи в графе могут быть ориентированными (дуги) и/или неориентированными (ребра).

Веса вершин и связей ($\eta_i \in [0, 1]$ и $\mu_i \in [0, 1]$) соответствуют степеням принадлежности нечеткому множеству. Они могут определяться экспертом, ЛПР или вычисляться посредством фаззификации [18, 19]. Для оценки значений показателей весов η_i и μ_i графа G предложено соотношение вербального описания показателей и диапазона численных значений весов вершин и связей. Всего таких диапазонов пять: 0 – показатель отсутствует; [0,01; 0,20] – очень слабый показатель; [0,21; 0,40] – слабый показатель; [0,41; 0,60] – умеренный показатель; [0,61; 0,80] – сильный показатель; [0,81; 1,00] – очень сильный показатель.

Рассмотрим пример модели системы охраны на основе ГН-графа.

Система охраны S_1 в текущий момент времени содержит следующие объекты: $ОО_1 - ОО_7$, $ПН_1, ПН_2$, ЛПР, $A_1 - A_2$.

Тогда ГН-граф G_1 , моделирующий систему S_1 , примет вид, отображенный на рисунке 1.

Соответствия объектов системы S_1 и вершин графа G_1 представлены в таблице 1. Здесь

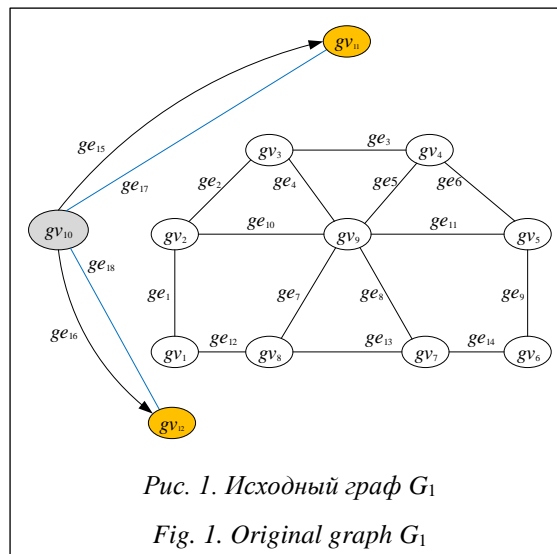


Рис. 1. Исходный граф G_1

Fig. 1. Original graph G_1

вершина gv_{10} , соответствующая ЛПР, не имеет веса, а веса вершин gv_{11}, gv_{12} (соответствующие агентам A_1, A_2) пока не определены. Численные значения весов вершин типов tpv_1 и tpv_2 определяются экспертом и зависят от условных диаметров объектов. Под условным диаметром будем понимать расстояние между максимально удаленными опорными точками объекта.

Численные значения весов вершин типа tpv_4 вычисляются посредством фаззификации и зависят от технических характеристик агентов. Значения весов вершин gv_{11}, gv_{12} будут получены после формирования зон влияния объектов.

Существующие отношения в системе S_1 и соответствующие им связи в графе G_1 отражены в таблице 2. Здесь веса связей имеют различную интерпретацию, например, веса связей типов tp_1 и tp_2 соответствуют степени удаленности объектов, а веса множественных связей в виде вектора – степени достоверности использования одного из трех каналов передачи данных (Wi-Fi, Bluetooth или УКВ). В текущий момент времени, когда агенты находятся в исходном состоянии (зоны их влияния еще не определены), значения весов связей ge_{17}, ge_{18} определены как $\eta_{17} = \eta_{18} = \langle 0; 0; 0 \rangle$. Следует отметить, что веса связей типа tp_3, tp_4 и множественные связи в виде вектора v будут изменены после формирования зон влияния объектов системы.

В работах [15, 20] подробно описан метод формирования зон влияния объектов СТС, основанный на применении ГН-графа и модифицированных алгоритмических средств, в том числе алгоритмов поиска кратчайших путей и пропорционального разделения ГН-графа. Предложенный метод можно представить в виде последовательности пяти событий:

Таблица 1

Соответствие объектов в системе C_1 и вершин графа G_1

Table 1

Correspondence between objects in system C_1 and vertices in graph G_1

| Назначение объектов системы | Вершины графа, gv_i | Типы вершин, tpv_i | Веса вершин, η_i |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| ОО ₁ – ОО ₆ | $gv_1 - gv_6$ | tpv_1 | по 0,05 |
| ОО ₇ | gv_9 | tpv_1 | 0,4 |
| ПН ₁ , ПН ₂ | gv_7, gv_8 | tpv_2 | по 0,005 |
| ЛПР | gv_{10} | tpv_3 | – |
| A ₁ , A ₂ | gv_{11}, gv_{12} | tpv_4 | – |

Таблица 2

Соответствие отношений в системе C_1 и связей графа G_1

Table 2

Correspondence between relations in system C_1 and edges in graph G_1

| Виды связей | Типы связей, tp_i | Связи графа, ge_j | Веса связей, μ_i | Отношения между объектами системы |
|------------------------------------|---|---|----------------------------|--|
| Разнотипные связи | tp_1 | $ge_1 - ge_6, ge_9 - ge_{11}$ | по 0,4; по 0,5 | «удаленность ОО» |
| | tp_2 | $ge_7, ge_8, ge_{12}, ge_{13}, ge_{14}$ | 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,3 | «удаленность ПН» |
| | tp_3 | ge_{15}, ge_{16} | – | «управлять движением» |
| | tp_4 | $ge_{19} - ge_{28}$ | – | «наблюдать» |
| Множественные связи в виде вектора | $\vec{v} = \langle v_1, v_2, v_3 \rangle$ | ge_{17}, ge_{18} | – | «передача информации по каналам»: $v_1 - Wi-Fi,$ $v_2 - Bluetooth,$ $v_3 - УКВ$ |

1. Разработка модели системы на основе ГН-графа;

2. Применение модифицированного алгоритма Беллмана – Форда поиска кратчайших путей ГН-графа и вычисление метрик графа (радиус, диаметр, множества центральных и периферийных вершин);

3. Анализ метрик ГН-графа;

4. Применение алгоритма пропорционального разделения ГН-графа на подграфы с целью формирования зон влияния объектов системы;

5. Вычисление метрик подграфов и их анализ на соответствие характеристикам объектов системы.

Анализ метрик графа, подграфов выполняется экспертом. Следует отметить, что события 4 и 5 могут повторяться несколько раз до тех пор, пока полученные метрики подграфов не будут соответствовать характеристикам объектов системы по критерию оптимальности.

Кратко рассмотрим применение предложенного метода на примере графа G_1 (рис. 1) с учетом технических характеристик агентов системы.

Событие 1. Модифицируется модель за счет использования фильтров к множествам вершин и связей по заданному типу. Получен граф G^1_1 , учитывающий только вершины типов tpv_1 и tpv_2 и связи типов tp_1 и tp_2 .

Событие 2. Для графа G^1_1 получены метрики: радиус $r(G^1_1) = 0,8$ и диаметр $D(G^1_1) = 1,4$.

Событие 3. Полученные метрики графа G^1_1 позволяют предположить, что для покрытия всей зоны охраны потребуется два агента. Тогда будем делить граф G^1_1 на две части в равных пропорциях.

Событие 4. В результате применения алгоритма пропорционального разделения ГН-графа получены подграфы

$$G^{1.1}_1 = \{ge_1, ge_2, ge_3, ge_8, ge_9\},$$

$$G^{1.2}_1 = \{ge_4, ge_5, ge_6, ge_7, ge_9\}. \tag{1}$$

Событие 5. Получены значения метрик подграфов $D(G^{1.1}_1) = 0,8$ и $D(G^{1.2}_1) = 0,8$, анализ которых позволяет констатировать, что двух агентов достаточно для покрытия зоны охраны без учета жизненного цикла устройств.

Таким образом, для системы C_1 получены зоны влияния двух агентов: $A_1 = \{ОО_1, ОО_2,$

$OO_3, OO_9, ПН_2\}$ и $A_2 = \{OO_4, OO_5, OO_6, OO_9, ПН_1\}$. Тогда исходный граф G_1 с учетом двух зон влияния объектов примет вид, отображенный на рисунке 2. Здесь дополнительно появляются связи типа $tp_4 ge_{19} - ge_{28}$ (отношение «наблюдать»), вес которых может интерпретироваться как степень удаленности агентов от объекта охраны или потенциального нарушителя. Для связей ge_{17}, ge_{18} значения весов $\eta_{17} = \eta_{18} = \langle 0,8; 0; 0,2 \rangle$ означают, что достоверность события передачи данных от агента к ЛПР через Wi-Fi составляет 80 %.

Преимущества использования ГН-графа для моделирования сложных систем подтверждаются результатами экспериментов [12–14]. Однако в таких моделях каждый объект представляется одной вершиной. Сложности возникают, если объект системы является достаточно большим, тогда это необходимо учитывать в процессе вычисления характеристик, в частности, расстояний графа.

Например, в таблице 1 для некоторых вершин определены веса $\eta_1 - \eta_6$ как 0,05 и $\eta_7 = \eta_8$, то есть 0,005, что соответствует очень слабому показателю, а вес $\eta_9 = 0,4$ – умеренный показатель. Поскольку веса этих вершин интерпретируются как условный диаметр объекта, то при формировании зон влияния в системе объектами малого размера можно пренебречь, а объекты среднего и большого размера необходимо учитывать.

С данной задачей можно справиться с помощью моделей на основе гиперграфов за счет возможности представления групп объектов.

Модификация ГН-гиперграфа

В работе [16] для моделирования СТС предложено использование модели на основе ГН-гиперграфа, который позволяет объединить модели нечеткого графа с множественными и разнотипными связями [12] и неориентированного гиперграфа. Формально ГН-гиперграф задан нечеткими конечными множествами:

$$H = (Gv, Ge, He, Hg), \tag{2}$$

где Gv – множество однотипных вершин ($gv \in Gv$); Ge – множество связей между вершинами ($ge \in Ge$); He – множество однотипных гиперребер ($he \in He, he - hyperedge$); Hg – множество однотипных связей между вершиной и гиперребром ($hg \in Hg, hg - hyperedge-vertex$). Вершины и связи в таком гиперграфе могут иметь веса.

В рамках данной работы предлагается модификация модели на основе ГН-гиперграфа (2) за счет объединения ряда новых возможностей. В модифицированном ГН-гиперграфе дополнительно допускается использование разнотипных вершин (как в моделях на основе ГН-графа), разнотипных гиперребер и множественных разнотипных связей между вершиной и гиперребром.

Тогда модифицированный ГН-гиперграф примет вид

$$H' = (Gv, Ge, He, Hg), \tag{3}$$

где множества Gv и Ge определены для графа G , множество гиперребер содержит подмножества по типам $He = \{He(tphe_p)\}$, а множество связей между вершиной и гиперребром содержит подмножества разнотипных связей $Hg(tphg_k)$

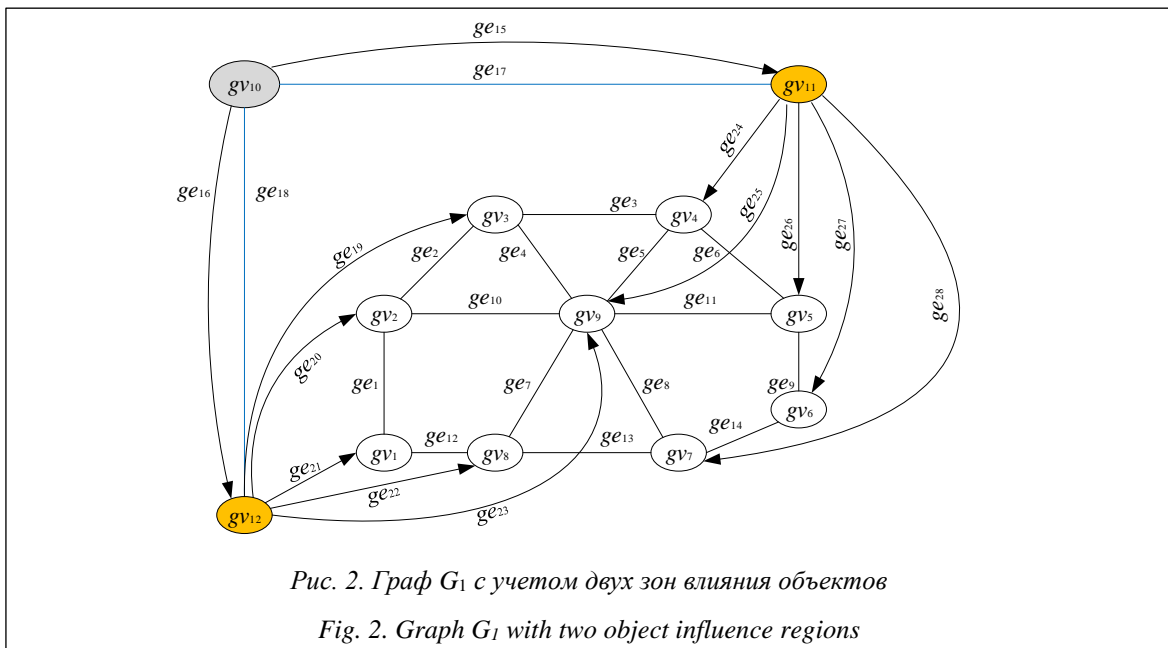


Рис. 2. Граф G_1 с учетом двух зон влияния объектов

Fig. 2. Graph G_1 with two object influence regions

и множественных связей в виде вектора $Hg(vhg_e)$: $Hg = \{Hg(tphg_k), Hg(vhg_e)\}$. В качестве связей гиперграфа ge и hg могут использоваться дуги и/или ребра. Вершины и связи в таком гиперграфе могут иметь веса [18, 19].

Моделирование СТС на основе модифицированного ГН-гиперграфа

Выполним переход от графа G_1 к модели на основе гиперграфа H'_1 , заданной в соответствии с (3) с использованием результатов, полученных в (1). Тогда гиперграф H'_1 (рис. 3) содержит следующие элементы:

- вершины $gv_1 - gv_{10}$ и связи $ge_1 - ge_{14}$, определенные в таблице 1;
- разнотипные гиперребра he_1, he_2 (тип $trhe_1$);
- разнотипные связи между вершиной и гиперребром hg_1 и hg_2 (тип $trhg_1$);
- множественные связи между вершиной и гиперребром в виде вектора hg_3 и hg_4 (тип vhg_1).

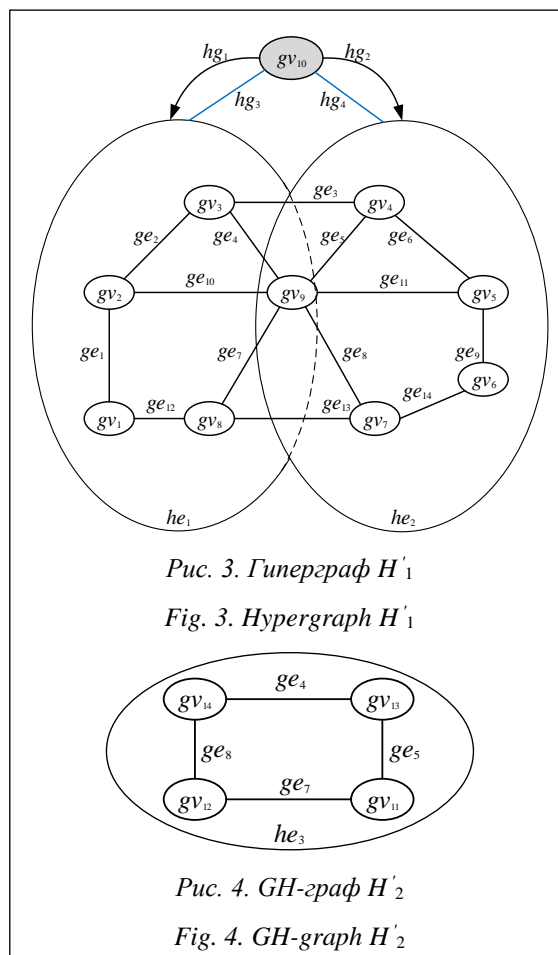
Гиперребра he_1, he_2 в модели соответствуют зонам влияния агентов A_1 и A_2 , связи hg_1 и hg_2 – отношению «наблюдать», а связи hg_3 и hg_4 – отношению «передача информации по каналам».

Однако в данной реализации гиперграфа H'_1 по-прежнему не решена проблема представления объектов, размер которых необходимо учитывать при поиске расстояний. Предлагается подход, основанный на представлении объекта системы не одной, а несколькими вершинами, например, с учетом опорных точек объектов. Под ними будем понимать части объекта – углы или ребра здания, места, через которые может проникнуть потенциальный нарушитель (окна, двери) и т.д.

Тогда объект большой протяженности (на рис. 3 – вершина gv_9) можно представить в виде гиперграфа H_2 , как показано на рисунке 4. Здесь вершины $gv_{11} - gv_{14}$ соответствуют опорным точкам объекта OO_7 системы S_1 , а гиперребро he_3 (тип $trhe_2$) – объекту OO_7 в целом.

На рисунке 5 представлен исходный гиперграф H'_1 , полученный с помощью предложенного подхода. Здесь, кроме обозначенных выше связей, используются связи между вершиной и гиперребром $hg_5 - hg_{10}$ (тип $trhg_2$), которые представляют отношение «удаленность объектов».

Показана процедура перехода от ГН-графа к модифицированному ГН-гиперграфу, который обладает возможностями и преимуществами



ми ГН-графа и дополнительно позволяет использовать разнотипные гиперребра и множественные разнотипные связи в виде вектора между вершиной и гиперребром, что отличает его от известных моделей. Это позволяет представить разнотипные объекты или их группы и разнотипные отношения между ними и снизить время анализа системы.

Таким образом, рассмотренные примеры подтверждают утверждение об эффективности применения ГН-моделей для решения практических задач взаимодействия объектов в СТС. Их математический аппарат позволяет задать возможные отношения в системе и при этом уменьшить время анализа системы с разнотипными информационными потоками.

Программная реализация

В настоящее время выполняется модернизация программного комплекса [20] для реализации моделей на основе ГН-графов. Требования динамичности к среде моделирования предусматривали обновление ПО. Принято решение об использовании клиент-серверной архитек-

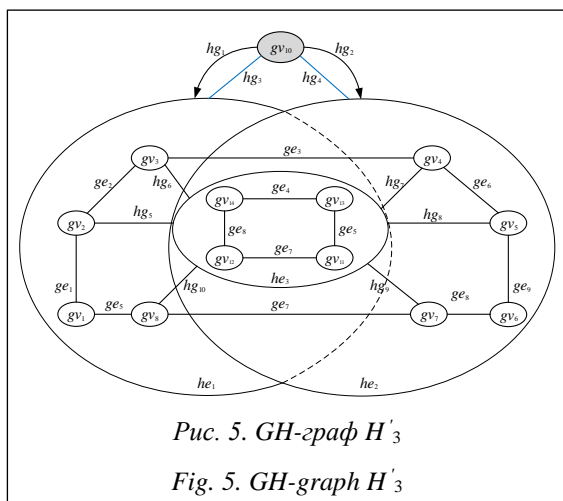


Рис. 5. GH-граф H'_3

Fig. 5. GH-graph H'_3

туры программного комплекса [21] и о смене языка разработки на Python. В программном комплексе граф представляется файлом в формате JSON (<http://www.swsys.ru/uploaded/image/2025-4/4.jpg>).

Разработана структура программного комплекса моделирования взаимодействия объектов системы [15, 20], определены ее функциональные возможности и реализован ряд модулей:

- динамической визуализации графовой модели;
- реализации алгоритма пропорционального разделения графа;
- реализации алгоритма поиска кратчайших путей;
- вычисления характеристик графа.

Разработанный программный комплекс может функционировать в различных операционных системах, авторы планируют его использовать с применением средств SQL или NoSQL БД, например, при помощи графовой СУБД Neo4j и т.п. [22]. Выполняются работы по расширению программного комплекса в части реализации GH-гиперграфа. В настоящее время реализованы модифицированные алгоритмические средства для вычисления метрик гиперграфа.

Дальнейшее развитие предложенных моделей с использованием методов ИИ

Для решения задач классификации и прогнозирования возможно развитие предложенного подхода за счет использования алгоритмов автономного обучения объяснимых графовых или гиперграфовых нейронных сетей. К таким относятся алгоритмы поиска кратчайших путей и вычисления характеристик в GH-моделях, визуализации GH-моделей, функцио-

нирования искусственного нейрона, функционирования глубокой графовой (гиперграфовой) нейронной сети, теории оптимизации и т.д.

Сейчас проводится работа по программной реализации таких алгоритмов на языке Python с использованием библиотек Tensorflow, Keras, Scipy, Scikit-learn, Numpy и др. Алгоритмы поиска кратчайших путей и вычисления характеристик в GH-моделях позволяют определить метрики на соответствие характеристикам агентов. Алгоритм функционирования искусственного нейрона используется как основа для построения многослойных и иерархически сложных конфигураций, имитирующих мыслительный процесс человека. Алгоритм функционирования глубокой графовой (гиперграфовой) нейронной сети предназначен для расчета математической модели нейронной сети. Данный алгоритм основывается на комбинации классических нейронных сетей со сложной архитектурой и большим числом слоев. Алгоритмы оптимизации работают автоматически или вызываются из Tensorflow/Keras в процессе проведения экспериментов и обучения сети.

Задача классификации может быть решена в части определения соответствия реальной модели агента с учетом технических характеристик и его графового (гиперграфового) представления, а задача прогнозирования – в части определения количества агентов, необходимых для обеспечения функций охраны протяженного периметра, в зависимости от их технических характеристик.

Заключение

Статья посвящена разработке методов и программных средств моделирования СТС на основе модифицированных гиперграфов. Предложен модифицированный GH-гиперграф, который расширяет объединение GH-графа и неориентированного гиперграфа и отличается от известных моделей сочетанием разнотипных вершин и множественных разнотипных связей, что позволяет представить разнотипные элементы сложных систем (объекты, группы объектов, отношения). Рассмотрены примеры использования GH-моделей для анализа взаимодействий объектов СТС. Показана процедура перехода от GH-графа к GH-гиперграфу. Использование множественных связей в виде вектора, объединяющих ряд разнотипных связей, позволяет снизить время работы некоторых алгоритмов, выполняющих обходы графа. Результаты ранее выполненных экспериментов показали уменьшение времени формирования

матрицы расстояний для ГН-моделей размерностью до 1 000 вершин не менее чем в 1,3 раза | по сравнению с графами, допускающими только разнотипные связи.

Список литературы

1. Чуляев И.И. Интеллектуальная защита сложных организационно-технических систем // Системы компьютерной математики и их приложения. 2020. № 21. С. 230–237.
2. Сеньков А.В. Шаблоны взаимодействия интеллектуальных моделей для моделирования и управления рисками в сложных организационно-технических системах // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 33. № 8. С. 51–62.
3. Балута В.И., Варыханов С.С., Осипов В.П. и др. Анализ сложных слабоформализуемых природно-технических систем при помощи технологии когнитивного моделирования // Математическое моделирование. 2025. Т. 37. № 2. С. 111–127.
4. Борисов В.В., Луферов В.С. Метод многомерного анализа и прогнозирования состояния сложных систем и процессов на основе нечетких когнитивных темпоральных моделей // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 1–23.
5. Горелова Г.В. Постановка задачи имитационного моделирования процессов принятия решений в сложных организационно-технических системах // Изв. ЮФУ. Технич. науки. 2020. № 1. С. 134–144. doi: 10.18522/2311-3103-2020-1-134-144.
6. Лазарев И.В. Применение графовой модели для оценки эффективности комплекса технических средств систем охраны // Охрана, безопасность, связь. 2020. № 5–2. С. 151–153.
7. Божко А.Н. Анализ механических структур сложных технических систем // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13. № 5. С. 903–916. doi: 10.20537/2076-7633-2021-13-5-903-916.
8. Антонова В.М., Балакин К.А., Гречишкина Н.А. и др. Применение теории гиперграфов для решения задачи оптимизации производительности сетей в гражданской авиации // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 4. С. 203–210. doi: 10.53921/18195822_2021_21_4_203.
9. Лыгин В.С., Сирота А.А., Головинский П.А. Регуляризация процесса обучения графовых нейронных сетей методом распространения меток // Вестн. ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2024. № 3. С. 92–101. doi: 10.17308/sait/1995-5499/2024/3/92-101.
10. Yifan F., Haoxuan Yo., Zizhao Z. et al. Hypergraph neural networks. ArXiv, 2018, pp. 1–9. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.09401> (дата обращения: 26.06.2025).
11. Ikhlaq H.M., Ismail R., Siddiqui H.M.A., Nadeem M.F. A new technique to uniquely identify the edges of a graph. *Symmetry*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 762. doi: 10.3390/sym15030762.
12. Мунтян Е.Р. Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 3. С. 411–418. doi: 10.15827/0236-235X.127.411-418.
13. Еремеев А.П., Мунтян Е.Р. Разработка онтологии на основе графов с множественными и разнотипными связями // ИИиПР. 2021. № 3. С. 3–18. doi: 10.14357/20718594210301.
14. Muntyan E.R., Melnik E.V. The graph-based analysis of structural delays in distributed multiprogram systems of information processing. *JPCS*, 2020, vol. 1661, art. 012061. doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012061.
15. Зяблова Е.Р. Модификация алгоритма поиска кратчайших путей ГН-графа для анализа сложных технических систем // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 3. С. 354–363. doi: 10.15827/0236-235X.147.354-363.
16. Vereshun V.D., Kolodenkova A.E., Muntyan E.R. Integrated approach to modeling the objects of complex technical systems. In: *LNNS. Proc. ИПТ*, 2022, vol. 330, pp. 199–204. doi: 10.1007/978-3-030-87178-9_20.
17. Сергеев Н.Е., Целых Ю.А. ГН-модели социальных сетей // Изв. ЮФУ. Технич. науки. 2009. № 1. С. 90–95.
18. Minaev Y.N., Filimonova O.Y., Minaeva J.I., Filimonov A. Fuzzy mathematics with limited possibilities for assigning membership functions. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2020, vol. 56, no 1, pp. 29–39. doi: 10.1007/s10559-020-00218-9.
19. Дандыбаев С.Т. Нечеткие множества с нечеткими функциями принадлежности // Теория и практика современной науки. 2021. № 1. С. 130–133.
20. Мунтян Е.Р. Разработка алгоритма пропорционального разделения ГН-графа для формирования зон влияния объектов в сложных технических системах // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 378–387. doi: 10.15827/0236-235X.143.378-387.
21. Cormen Th.H., Leiserson Ch.E., Rives R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. London, 2022, 1312 p.
22. Еремеев А.П., Панявин Н.А. Унификация модели представления данных и преобразование форматов на основе нереляционной СУБД Neo4j // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 549–556. doi: 10.15827/0236-235X.140.549-556.

Hypergraph-based modeling of complex technical systems for agent interaction determinationEvgeniya R. Zyblova ¹✉¹ Southern Federal University, Taganrog, 347900, Russian Federation**For citation**

Zyblova, E.R. (2025) 'Hypergraph-based modeling of complex technical systems for agent interaction determination', *Software & Systems*, 38(4), pp. 588–597 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.152.588-597

Article info

Received: 01.07.2025

After revision: 04.07.2025

Accepted: 24.07.2025

Abstract. The paper notes the expediency of using GH-graphs and GH-hypergraphs for modeling complex technical systems. It provides a description of a software package for modeling interaction between objects in complex systems using the Python programming language. The software package includes modules for dynamic visualization of the graph model, computation of graph characteristics, implementation of proportional graph partitioning algorithms, and shortest path search. The author uses the JSON format to represent graph structures. This paper is a development of the author's previous works, where the GH-graph is defined as a fuzzy graph with different types of vertices and multiple edges of different types. The advantages of the GH-graph include its ability to represent heterogeneous relationships in complex systems and its reduction of computation time for various characteristics through the use of multi-dimensional connection vectors that unify diverse relationship types. The author proposes a modification of the GH-hypergraph, which consists in the integration of the GH-graph into the hypergraph. The modified GH-hypergraph has the advantages of a GH-graph and additionally allows the use of different types of hyperedges and multiple edges of different types between a vertex and a hyperedge. This makes it possible to represent objects (groups of objects) of different types, different relationships between an object and a group of system objects, and reduce the time needed to analyze the system. Using the example of a specified extended perimeter security system, the paper demonstrates modeling capabilities for object interactions based on GH-graphs and GH-hypergraphs. As a practical example, the solution to the problem of forming zones of influence for system objects is considered. The method comprises system modeling stages along with computation of metrics for the GH-model and/or its components. Experimental results demonstrate at least a 1.3-fold reduction in metric computation time for models with up to 1000 vertices, compared to models that only support heterogeneous vertex connections. Future development of the proposed method can be achieved by addressing classification and forecasting tasks through predictive models based on explainable graph or hypergraph neural networks.

Keywords: modeling, complex technical systems, fuzzy graph, software package, multiple edges, graph neural networks (GNN), hypergraph neural networks (HNN), GH-graph, GH-hypergraph

References

1. Chuklyaev, I.I. (2020) 'Informational security of technical systems', *Computer Mathematics Systems and their Applications*, (21), pp. 230–237 (in Russ.).
2. Senkov, A.V. (2020) 'Patterns of interaction of intelligent models for modeling and risk management in complex organizational and technical systems', *Soft Measurements and Calculations*, 33(8), pp. 51–62 (in Russ.).
3. Baluta, V.I., Varykhanov, S.S., Osipov, V.P. et al (2025) 'Analysis of complex poorly formalized natural engineering systems using cognitive modeling technology', *Mathematical Modeling*, 37(2), pp. 111–127 (in Russ.).
4. Borisov, V.V., Lufarov, V.S. (2020) 'The method of multidimensional analysis and forecasting states of complex systems and processes based on fuzzy cognitive temporal models', *Syst. of Control, Communication and Security*, (2), pp. 1–23 (in Russ.).
5. Gorelova, G.V. (2020) 'Statement the problem of simulation of decision-making processes in complex organizational-technical systems', *Izv. SFedU. Engineering Sci.*, (1), pp. 134–144 (in Russ.). doi: 10.18522/2311-3103-2020-1-134-144.
6. Lazarev, I.V. (2020) 'Application of a graphic model for evaluating the efficiency of the complex of technical means of security systems', *Safety, Security, Communication*, (5–2), pp. 151–153 (in Russ.).
7. Bozhko, A.N. (2021) 'Analysis of mechanical structures of complex technical systems', *Comput. Research and Modeling*, 13(5), pp. 903–916 (in Russ.). doi: 10.20537/2076-7633-2021-13-5-903-916.
8. Antonova, V.M., Balakin, K.A., Grechishkina, N.A. et al. (2021) 'Application of the Hypergraphs theory to solve the problem of optimizing network performance in civil aviation', *Inform. Processes*, 21(4), pp. 203–210 (in Russ.). doi: 10.53921/18195822_2021_21_4_203.
9. Lygin, V.S., Sirota, A.A., Golovinsky, P.A. (2024) 'Regularization of the learning process of graph neural networks by the method of label propagation', *Vestn. VGU. Ser.: Sys. Analysis and Inform. Tech.*, (3), pp. 92–101 (in Russ.). doi: 10.17308/sait/1995-5499/2024/3/92-101.
10. Yifan, F., Haoxuan, Yo., Zizhao, Z. et al. (2018) 'Hypergraph neural networks', *ArXiv*, pp. 1–9, available at: <https://arxiv.org/abs/1809.09401> (accessed June 26, 2025).
11. Ikhlaq, H.M., Ismail, R., Siddiqui, H.M.A., Nadeem, M.F. (2023) 'A new technique to uniquely identify the edges of a graph', *Symmetry*, 15(3), art. 762. doi: 10.3390/sym15030762.
12. Muntyan, E.R. (2019) 'Implementation of a fuzzy model of interaction between objects in complex technical systems based on graphs', *Software & Systems*, 32(3), pp. 411–418 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.127.411-418.

13. Ereemeev, A.P., Muntyan, E.R. (2021) 'Development of an ontology based on graphs with multiple and different types of edges', *Artificial Intelligence and Decision Making*, (3), pp. 3–18 (in Russ.). doi: 10.14357/20718594210301.
14. Muntyan, E.R., Melnik, E.V. (2020) 'The Graph-Based analysis of structural delays in distributed multiprogram systems of information processing', *JPCS*, 1661, art. 012061. doi: 10.1088/1742-6596/1661/1/012061.
15. Zyablova, E.R. (2024) 'Modification of the algorithm for finding shortest paths for the formation of influence zones of objects in complex technical systems on GH-graphs', *Software & Systems*, 37(3), pp. 354–363 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.147.354-363.
16. Vereshun, V.D., Kolodenkova, A.E., Muntyan, E.R. (2022) 'Integrated approach to modeling the objects of complex technical systems', in *LNNS. Proc. IITI*, 330, pp. 199–204. doi: 10.1007/978-3-030-87178-9_20.
17. Sergeev, N.E., Tselev, Yu.A. (2009) 'GH-models of social networks', *Izv. SFedU. Engineering Sci.*, (1), pp. 90–95 (in Russ.).
18. Minaev, Y.N., Filimonova, O.Y., Minaeva, J.I., Filimonov, A. (2020) 'Fuzzy mathematics with limited possibilities for assigning membership functions', *Cybernetics and Systems Analysis*, 56(1), pp. 29–39. doi: 10.1007/s10559-020-00218-9.
19. Dandybaev, S.T. (2021) 'Fuzzy sets with fuzzy membership functions', *Theory and Practice of Modern Sci.*, (1), pp. 130–133 (in Russ.).
20. Muntyan, E.R. (2023) 'Developing a GH-graph proportional separation algorithm to form of object influence zones in complex technical systems', *Software & Systems*, 36(3), pp. 378–387 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.143.378-387.
21. Cormen, Th.H., Leiserson, Ch.E., Rives, R.L., Stein, C. (2022) *Introduction to Algorithms*. London, 1312 p.
22. Ereemeev, A.P., Paniavin, N.A. (2022) 'Unification of a data presentation model and format conversion based on a Non-Relational Neo4j DBMS', *Software & Systems*, 35(4), pp. 549–556 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.140.549-556.

Авторы

Зяблова Евгения Ростиславовна¹, к.т.н.,
доцент, ermuntyan@sfned.ru

¹ Южный федеральный университет,
г. Таганрог, 347900, Россия

Authors

Evgeniya R. Zyablova¹, Cand. of Sci. (Engineering),
Associate Professor, ermuntyan@sfned.ru

¹ Southern Federal University,
Taganrog, 347900, Russian Federation