

## Методика индуктивного и дедуктивного синтеза моделей структурно сложных динамических сетей в форме графа знаний

И. А. Куликов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[i.a.kulikov@gmail.com](mailto:i.a.kulikov@gmail.com)

**Аннотация.** Представлена методика индуктивного и дедуктивного синтеза моделей структурно сложных динамических сетей (ССДС) в форме графа знаний. Целью статьи служит разработка методики индуктивного синтеза модели ССДС из частных моделей функционирующих в сети информационных систем, позволяющей определить удовлетворительную структуру модели с точки зрения времени ее синтеза и производительности выполнения запросов к модели в форме графа знаний, а также разработка методики дедуктивного синтеза модели ССДС с целью решения задачи актуальности модели в форме графа знаний на выбранный момент времени и определения наилучшей структуры модели с точки зрения производительности дедуктивного синтеза.

**Ключевые слова:** структурно сложная динамическая сеть, граф знаний, индуктивный синтез, дедуктивный синтез, RDF

**Для цитирования:** Куликов И. А. Методика индуктивного и дедуктивного синтеза моделей структурно сложных динамических сетей в форме графа знаний // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 7. С. 75–83. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-75-83.

Original article

## Methodology of Inductive and Deductive Synthesis of Models of Structurally Complex Dynamic Networks in the Form of a Knowledge Graph

I. A. Kulikov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[i.a.kulikov@gmail.com](mailto:i.a.kulikov@gmail.com)

**Abstract.** Tpresents a methodology for inductive and deductive synthesis of models of structurally complex dynamic networks (SCDN) in the form of a knowledge graph. The aim of the work is to develop a methodology for inductive synthesis of a SCDN model from particular models of information systems functioning in the network, which allows determining a satisfactory model structure in terms of its synthesis time and the performance of executing queries to the model in the form of a knowledge graph, as well as to develop a methodology for deductive synthesis of a SCDN model in order to solve the problem of the relevance of a model in the form of a knowledge graph at a selected point in time and determine the best model structure in terms of the performance of deductive synthesis.

**Keywords:** structurally complex dynamic network, knowledge graph, inductive synthesis, deductive synthesis, RDF

**For citation:** Kulikov I. A. Methodology for Inductive and Deductive Synthesis of Models of Structurally Complex Dynamic Networks in the Form of a Knowledge Graph // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 75–83. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-7-75-83.

**Введение.** В настоящее время граф знаний (ГЗ) часто используется как модель сложных динамических объектов [1]–[3]. Структурно слож-

ные динамические сети (ССДС) ввиду их размера, структуры и динамической структуры также относятся к сложным динамическим объектам,

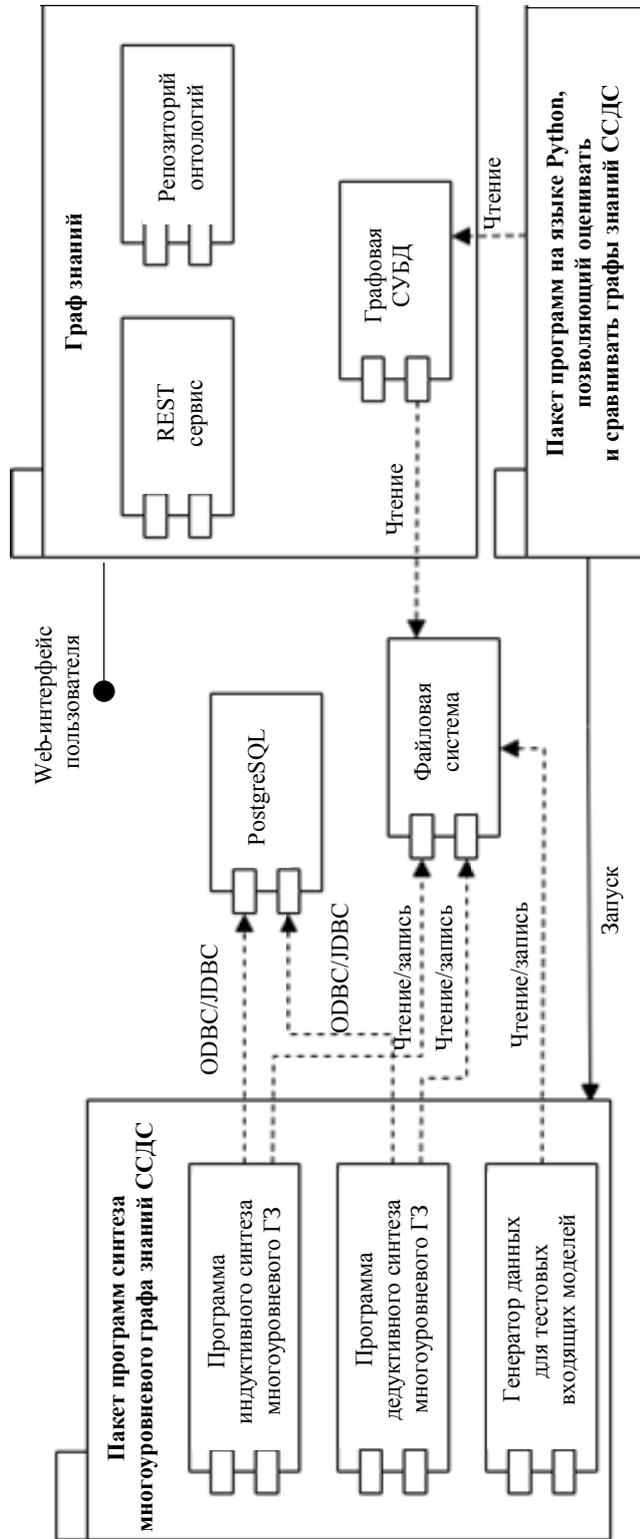


Рис. 1. Компонентная диаграмма разработанных инструментов индуктивного и дедуктивного синтеза моделей ССДС в форме ГЗ  
 Fig. 1. Component diagram of the developed tools for inductive and deductive synthesis of SCDN models in the form of a KG

модель которых может быть эффективно сформирована в форме графа знаний [4]. При этом структура ГЗ в значительной мере влияет на размер модели и производительности выполнения запросов к ней. Граф знаний ССДС состоит из статической и динамической частей, статическая часть строится из частных графовых моделей функционирующих в сети информационных систем, динамическая – из статистических и оперативных данных сети [4]. Поскольку для варианта телекоммуникационной сети большинство частных графовых моделей – модели топологии сети, биллинга, прав доступа, каталоги доступных приложений и данных и т. п., имеют иерархическую структуру, то существует возможность построения как многоуровневого, так и одноуровневого графов знаний телекоммуникационной сети. Все модели ССДС в форме графов знаний характеризуются их размером. В свою очередь, многоуровневые модели характеризуются числом уровней и распределением элементов по уровням. Для синтеза таких моделей предложен метод индуктивного синтеза, который позволяет строить модель ССДС в форме ГЗ из частных графовых моделей, динамических и статистических данных сети с учетом требований пользователей. Для архитекторов информационных систем и разработчиков методов синтеза моделей ССДС важно иметь возможность сравнения как методов синтеза моделей, так и производительности выполнения запросов к ним. В данной статье предлагается методика индуктивного и дедуктивного синтеза моделей структурно сложных динамических сетей в форме графа знаний. Индуктивный синтез позволяет строить графы знаний ССДС разного размера, с различной иерархической структурой и

распределением элементов по уровням. Также методика индуктивного синтеза позволяет оценить производительность синтеза модели и выполнения запросов к ней. Дедуктивный синтез моделей ССДС в форме графа знаний позволяет поддерживать модель в актуальном состоянии посредством доказательства существования целевой модели на заданный момент времени, используя прямой и обратный вывод. Также методика дедуктивного вывода позволяет сравнить время выполнения синтеза для одноуровневых и многоуровневых графов знаний ССДС с различными типами распределения элементов модели по уровням для различных вариантов реализации алгоритма дедуктивного синтеза (когда все данные, полученные от модели, обрабатываются сразу когда данные от модели поступают на вход метода в режиме, близком к реальному времени). В подразделе «Инструменты синтеза» представлено описание разработанных программных компонентов для индуктивного и дедуктивного синтеза моделей и генерации тестовых данных. В «Методиках синтеза» представлена методика использования инструментов индуктивного синтеза для создания моделей ССДС в форме графа знаний, анализа полученных моделей и методика применения инструментов дедуктивного синтеза моделей для поддержания их в актуальном состоянии, в подразделе «Выводы» приведены результаты выполненной работы.

**Инструменты синтеза.** Компонентная диаграмма разработанных инструментов индуктивного и дедуктивного синтеза моделей ССДС в форме ГЗ приведена на рис. 1.

Программный комплекс состоит из следующих компонентов:

Табл. 1. Входные и выходные данные для программы индуктивного синтеза

Tab. 1. Input and output data for the inductive synthesis program

Входные данные	Формат входных данных	Выходные данные	Формат выходных данных
Частные графовые модели информационных систем ССДС	CSV [5]	Модель ССДС в форме графа знаний	RDF/XML [6], массив Numpy
Правила связывания частных графовых моделей	CSV	Время выполнения индуктивного синтеза	Значение в миллисекундах

Табл. 2. Входные и выходные данные для программы дедуктивного синтеза

Tab. 2. Input and output data for the deductive synthetic program

Входные данные	Формат входных данных	Выходные данные	Формат выходных данных
Модель СДС в форме графа знаний с учетом требований пользователей, оперативных и статистических данных	RDF/XML, массив Numpy	Результат синтеза	Целевая модель доказана/ не доказана
Поток фактов о ТС	CSV	Время выполнения дедуктивного синтеза	Значение в миллисекундах

1. Пакет программ синтеза многоуровневого графа знаний ССДС, включая:

- Программу индуктивного синтеза многоуровневого ГЗ, входные и выходные данные программы представлены в табл. 1.

- Программу дедуктивного синтеза многоуровневого ГЗ, входные и выходные данные программы представлены в табл. 2.

- Генератор данных для тестовых входящих моделей, состоящий из следующих процедур:

а) генератор статических частных моделей информационных систем ССДС для многоуровневой модели, входные и выходные данные которого представлены в табл. 3. Генератор имеет следующие ограничения: число связываемых моделей – 2, число уровней связываемых моделей – 3, 4, 5. Структура генерируемых моделей представлена в табл. 4;

б) генератор динамических данных, входные и выходные данные которого представлены в табл. 5.

Табл. 3. Входные и выходные данные для генератора статических частных моделей информационных систем ССДС  
Tab. 3. Input and output data for the generator of static private models of information systems of the SSDS

Входные данные	Формат входных данных	Выходные данные	Формат выходных данных
Число элементов нижнего уровня связываемой модели #1 (M1)	Целое число $\geq 0$	Частные графовые модели ИС	CSV
Число элементов нижнего уровня связываемой модели #2 (M2)	Целое число $\geq 0$	Множество фактов для базового алгоритма дедуктивного синтеза	CSV
Число элементов на уровне 2 связываемых моделей (L2)	Целое число $\geq 0$	–	–
Число элементов на уровне 3 связываемых моделей (L3)	Целое число $\geq 0$	–	–
Число элементов на уровне 4 связываемых моделей (L4)	Целое число $\geq 0$	–	–
Число элементов на уровне 5 связываемых моделей (L5)	Целое число $\geq 0$	–	–

Табл. 4. Структура генерируемых моделей  
Tab. 4. Structure of generated models

Model #1		Model #2	
Level 1	1	Level 1	1
Level 2	L2	Level 2	L2
Level 3	L3	Level 3	L3
Level 4	L4	Level 4	L4
Level 5	L5	Level 5	L5
Level 6: objects	M1	Level 6: options	M2

2. Граф знаний, включая:

- графовую СУБД с поддержкой SPARQL 1.1 [7];

- репозиторий онтологий;

- динамический REST сервис для организации взаимодействия с внешними компонентами.

Табл. 5. Входные и выходные данные для генератора динамических данных  
Tab. 5. Input and output data for the dynamic data generator

Входные данные	Формат входных данных	Выходные данные	Формат выходных данных
Число динамических событий	Целое число $\geq 0$	Динамические данные модели в форме графа знаний	RDF/XML
Шаблон динамического события	CSV		

3. Реляционная СУБД PostgreSQL.

4. Файловая система для хранения входных и выходных данных в файловых форматах.

5. Пакет программ на языке Python, позволяющий оценивать и сравнивать графы знаний ССДС.

Взаимодействие между компонентами реализовано при помощи следующих связей:

- программа индуктивного синтеза производит чтение частных графовых моделей и оперативных данных ССДС из файлов, размещенных в Файловой системе;

- программа индуктивного синтеза формирует модели ССДС в формате RDF/XML и размещает их в файловом формате в Файловой системе;

- программа индуктивного синтеза сохраняет свои логи в файловой системе;

- программа индуктивного синтеза использует реляционную СУБД PostgreSQL для реализации операций над таблицами данных и хранения промежуточных результатов;

- загрузка моделей и оперативных данных в ГЗ производится из файлов формата RDF/XML, размещенных в файловой системе.

Исходный код разработанных компонентов размещен в открытом репозитории [8].

**Методики синтеза. Методика индуктивного синтеза.** Для определения структуры графа знаний ССДС требуется следовать методике, показанной на рис. 2. Методика описана в виде UML-диаграммы активностей и включает следующие шаги:

1. Определение перечня частных моделей сетевых ИС, присвоение им индексов –  $i = 1, \dots, N$ . В случае телекоммуникационной сети обычно в ней функционируют следующие информационные системы: система управления топологией сети, бил-

лингвая система, система управления правами доступа, каталоги приложений и ассетов данных и др.

2. Определение диапазона значений числа уровней в графе знаний ( $l = 1, \dots, L$ , где  $l$  – одноуровневый граф знаний,  $L$  – максимальное число уровней). Число уровней модели может варьироваться от 1 до максимального числа уровней в частных графовых моделях. Этот шаг позволяет сформировать модель ССДС в форме многоуровневого графа знаний, что дает возможность, с одной стороны, уменьшить число связей, так как при таком подходе есть возможность связывать не элементы нижних уровней иерархии, а узлы на разных уровнях группировки; с другой стороны, если решение бизнес-задачи может быть найдено на высоких уровнях модели, то при выполнении запроса будут вовлечены элементы только на более высоких уровнях, на которых число элементов модели значительно меньше, и, как следствие, запросы могут выполняться значительно быстрее.

3. Определение перечня видов распределения элементов модели по уровням и назначение им индексов ( $r = 1, \dots, R$ ). В [4] рассмотрены следующие виды распределения: равномерное, линейное, квадратическое и экспоненциальное. В общем случае число видов распределения элементов по уровням не ограничено.

4. Назначение начального значения для максимального числа уровней модели  $l = 1$  (одноуровневый граф знаний).

5. Назначение начального вида распределения элементов по уровням  $r = 1$ .

6. Выбор индекса частной графовой модели для ее генерации  $I = 1$ .

7. Вызов генератора данных частной графовой модели со следующими параметрами:

- а) число элементов модели  $K$ ;
- б) число уровней в модели  $l$ ;
- в) распределение элементов модели по уровням  $r$ .

Результат записывается в CSV-файл.

8. Если индекс частной графовой модели не равен максимальному значению, то осуществляется переход на шаг 9, если равен – на шаг 10.

9. Инкремент индекса частной графовой модели  $i = i + 1$ , переход на шаг 7.

10. Определение правил связывания частных графовых моделей (экспертным методом) и запись правил в CSV-файл.

11. Вызов метода индуктивного синтеза графа знаний со следующими параметрами:

- а) частные графовые модели в форме CSV-файлов;
- б) правила связывания частных графовых моделей в форме CSV-файла.

Результат записывается в RDF/XML файлы.

12. Загрузка RDF/XML файлов в RDF-хранилище данных. При этом записываются следующие метрики модели:

- а) число триплетов в графе знаний;
- б) время загрузки данных в хранилище.

13. Выполнение запросов SPARQL, сформированных для решения целевых бизнес-задач, для которых разрабатывается система. Запросы выполняются несколько раз. При этом фиксируется время выполнения запросов и рассчитываются следующие метрики:

- а) среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n x_i / n;$$

- б) среднеквадратическое отклонение

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}.$$

14. Если индекс вида распределения элементов по уровням модели не равен максимальному значению, то переход на шаг 15, если равен – на шаг 16.

15. Инкремент индекса вида распределения элементов по уровням модели  $r = r + 1$ , переход на шаг 6.

16. Если число уровней графа знаний не равно максимальному значению, то переход на шаг 17, если равен – на шаг 18.

17. Инкремент число уровней графа знаний  $l = l + 1$ , переход на шаг 6.

18. Сравнение моделей по полученным метрикам. Выбор наиболее подходящей структуры графа знаний ССДС.

Представленная методика позволяет выбрать наилучшую структуру модели ССДС исходя из особенностей структуры самой сети и решаемых таким образом задач.

**Методика дедуктивного синтеза.** Для наилучшей структуры графа знаний ССДС с точки зрения времени дедуктивного синтеза требуется следовать методике, показанной на рис. 3. Методика описана в виде UML-диаграммы активностей и включает следующие шаги:

1. Определение диапазона значений числа уровней в графе знаний ( $l = 1, \dots, L$ , где  $l$  – одноуровневый граф знаний,  $L$  – максимальное число уровней). Число уровней модели может варьироваться от 1 до максимального числа уровней в частных графовых моделях.

2. Определение перечня видов распределения элементов модели по уровням и назначение им индексов ( $r = 1, \dots, R$ ). В [4] рассмотрены следующие виды распределения: равномерное, линейное, квадратическое и экспоненциальное. В общем случае число видов распределения элементов по уровням не ограничено.

3. Определение диапазона номеров уровней, на которых происходит доказательство целевой модели ( $i = 1, \dots, L$ ).

4. Назначение начального значения для максимального числа уровней модели  $l = 1$  (одноуровневый граф знаний).

5. Назначение начального вида распределения элементов по уровням  $r = 1$ .

6. Назначение начального значения для уровня, на котором происходит доказательств целевой модели  $i = 1$ .

7. Запрос модели ССДС в форме графа знаний со следующими параметрами: число уровней мо-

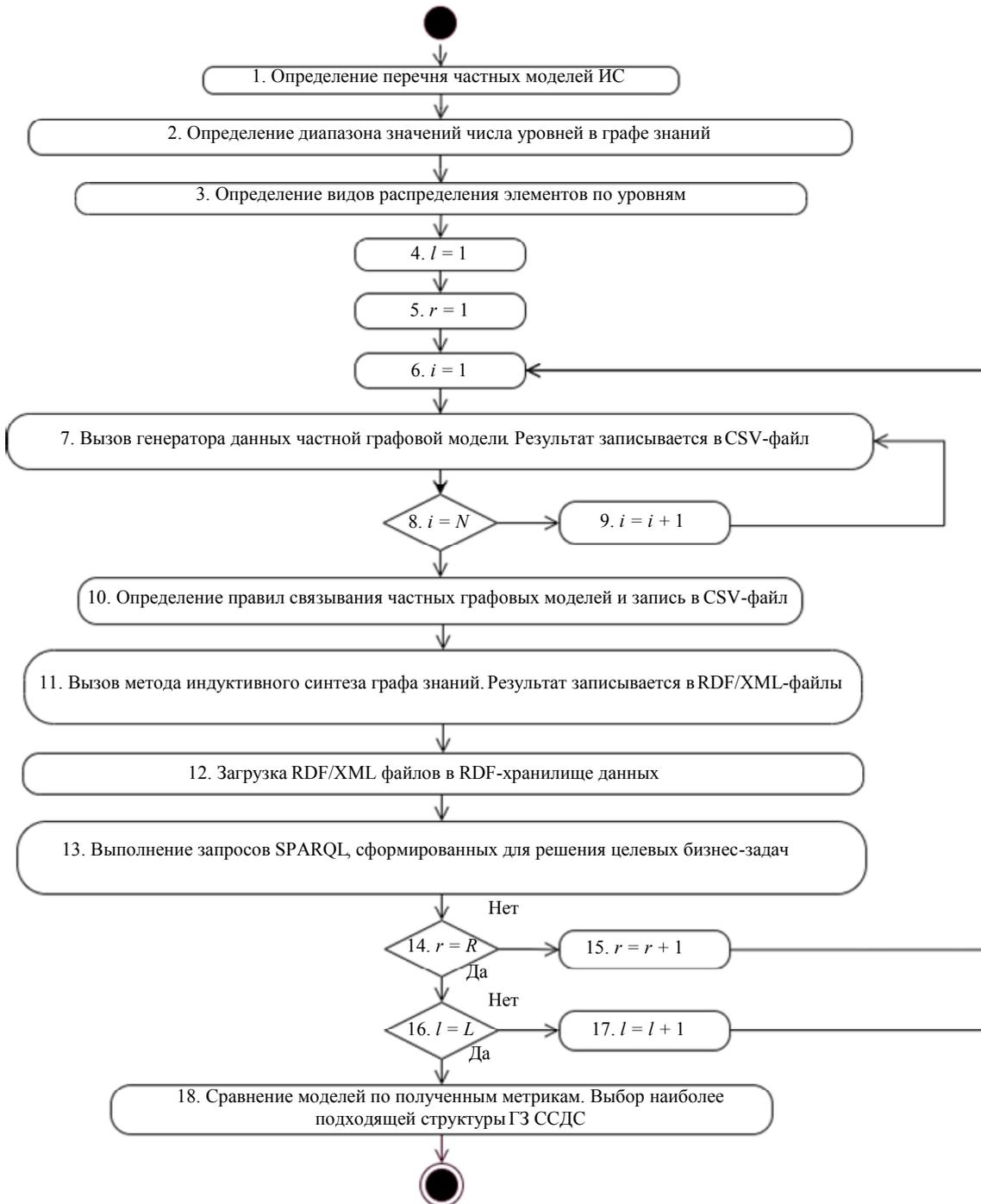


Рис. 2. Схема методики индуктивного синтеза модели ССДС в форме графа знаний  
Fig. 2. Scheme of the methodology of inductive synthesis of the SCDN model in the form of a knowledge graph

дели –  $l$ ; тип распределения элементов модели по уровням –  $r$ .

8. Последовательный вызов методов дедуктивного синтеза графа знаний для обработки всех поступивших фактов от сети и для обработки фактов в режиме, близком к реальному времени, со следующими параметрами: номер уровня, на котором происходит доказательство целевой модели –  $i$ . Результаты времени синтеза сохраняются.

9. Если номер уровня доказательства целевой модели не равен максимальному значению, то переход на шаг 10, если равен – на шаг 11.

10. Инкремент номера уровня доказательства целевой модели  $i = i + 1$ , переход на шаг 8.

11. Если индекс вида распределения элементов по уровням модели не равен максимальному

значению, то переход на шаг 12, если равен – на шаг 13.

12. Инкремент индекса вида распределения элементов по уровням модели  $r = r + 1$ , переход на шаг 7.

13. Если число уровней графа знаний не равно максимальному значению, то переход на шаг 14, если равен – на шаг 15.

14. Инкремент числа уровней графа знаний  $l = l + 1$ , переход на шаг 7.

15. Сравнение моделей по полученным метрикам. Выбор наиболее подходящей структуры графа знаний ССДС с точки зрения производительности дедуктивного синтеза.

Представленная методика позволяет выбрать наилучшую структуру модели ССДС с точки зре-

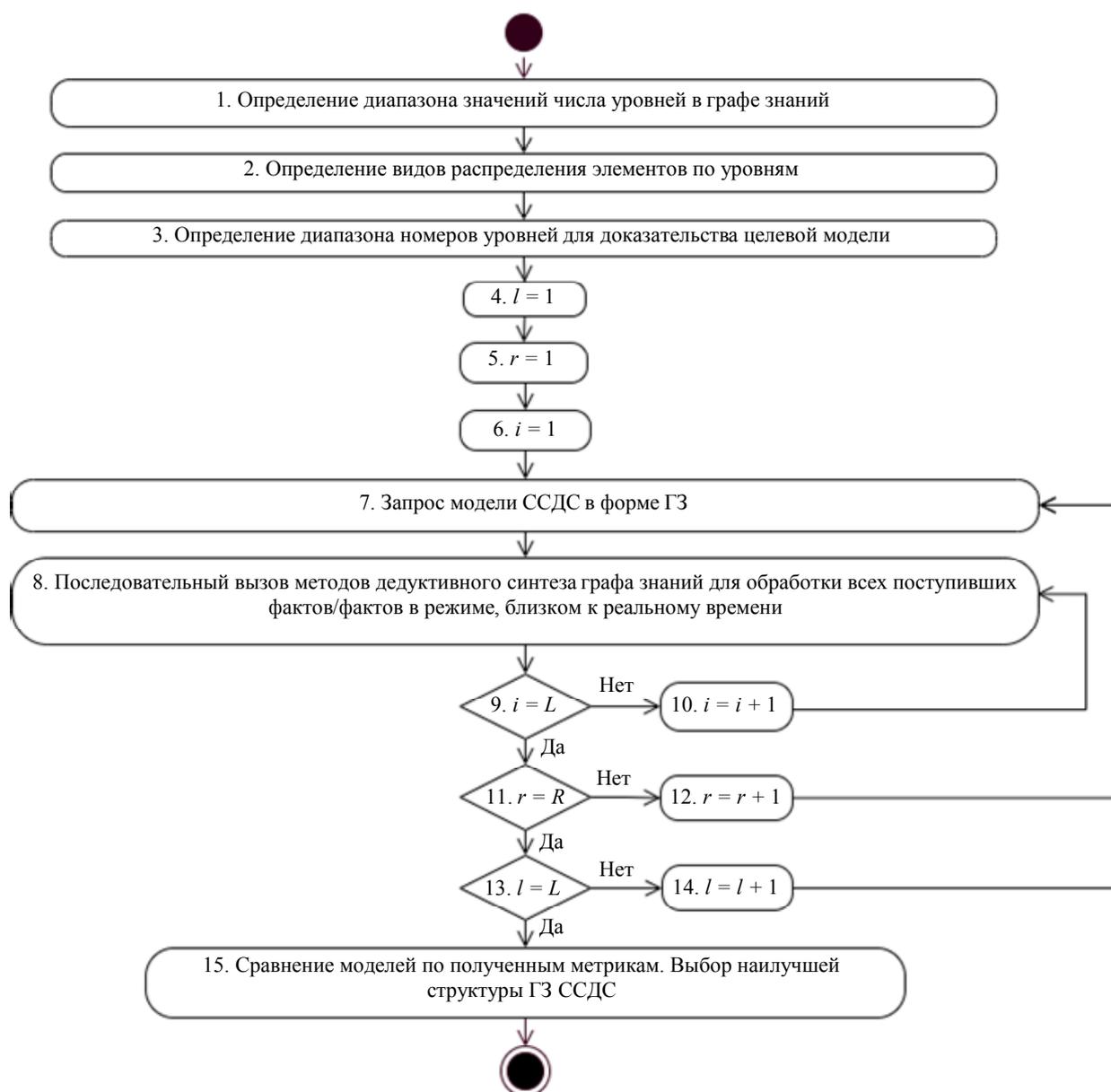


Рис. 3. Схема методики дедуктивного синтеза модели ССДС в форме графа знаний  
 Fig. 3. Scheme of the methodology of deductive synthesis of the SCDN model in the form of a knowledge graph

ния производительности дедуктивного синтеза модели ССДС.

**Выводы.** В статье представлены методики индуктивного и дедуктивного синтеза моделей ССДС в форме одноуровневых и многоуровневых графов знаний. Предлагаемая методика индуктивного синтеза моделей ССДС позволяет строить синтетические модели сети в форме одноуровневого и многоуровневых графов знаний с различным числом уровней. Построенная модель может содержать различное число элементов, включать в себя статические и динамические данные сети, иметь различное распределение элементов модели по уровням для многоуровневых моделей. Предлагаемое решение позволяет

сравнивать производительность индуктивного синтеза моделей ССДС в форме графа знаний и время выполнения SPARQL-запросов к полученной модели. Предлагаемая методика дедуктивного синтеза моделей ССДС в форме графа знаний позволяет проводить дедуктивный синтез моделей сети в форме одноуровневого и многоуровневых графов знаний с различным числом уровней. Предлагаемое решение позволяет сравнивать производительность дедуктивного синтеза моделей ССДС в форме графа знаний. В качестве дальнейшего развития целесообразно рассмотреть возможность автоматизированной оптимизации структуры модели сети с целью повышения скорости выполнения запросов к ней.

#### Список литературы

1. Knowledge graphs in digital twins for manufacturing. Lessons learned from an industrial case at Atlas Copco Airpower / B. Meyers, J. Van Noten, P. Lietaert, B. Tielemans, H. Hristov, D. Maes, K. Gadeyne // In IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, no 10. P. 13–18. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.361.

2. Knowledge Graphs // A. Hogan, E. Blomqvist, M. Cochez, C. d'Amato, G. de Melo, C. Gutierrez, S. Kirrane, J. Labra Gayo, R. Navigli, S. Neumaier, A.-C. Ngonga Ngomo, A. Polleres, S. Rashid, A. Rula, L. Schmelzeisen, J. Sequeda, S. Staab, A. Zimmermann // ACM Comp. Surv. 2021. Vol. 54. P. 1–37. doi: 10.1145/3447772.

3. Automated domain-specific healthcare knowledge graph curation framework: Subarachnoid hemorrhage as phenotype // Kh. M. Malik, M. Krishnamurthy, M. Alobaidi, M. Hussain, F. Alam, G. Malik // Expert Syst. with Appl. 2020. Vol. 145. P. 113120. doi: 10.1016/j.eswa.2019.113120.

4. Synthesis of multilevel knowledge graphs: Methods and technologies for dynamic networks / T. Man, A. Vodyaho, D. I. Ignatov, I. Kulikov, N. Zhukova // Engin. Appl. of Artificial Intelligence. 2023, Vol. 123. P. 106244. doi: 10.1016/j.engappai.2023.106244.

5. Common Format and MIME Type for Comma-Separated Values (CSV) Files. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4180> (дата обращения: 12.05.2025).

6. RDF 1.1 XML Syntax. URL: <https://www.w3.org/TR/rdf-syntax-grammar/> (дата обращения: 12.05.2025).

7. SPARQL 1.1 Overview. W3C Recommendation 21.03.2013. URL: <https://www.w3.org/TR/2013/REC-sparql11-overview-20130321> (дата обращения: 12.05.2025).

8. Исходный код программного комплекса индуктивного синтеза моделей структурно сложных динамических сетей в форме графа знаний URL: <https://github.com/kulikovia/KG4CDO> (дата обращения: 22.03.2025).

---

#### Информация об авторе

**Куликов Игорь Александрович** – ассистент кафедры МОЭВМ СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [i.a.kulikov@gmail.com](mailto:i.a.kulikov@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0002-2532-5579>

#### References

1. Knowledge graphs in digital twins for manufacturing. Lessons learned from an industrial case at Atlas Copco Airpower / B. Meyers, J. Van Noten, P. Lietaert, B. Tielemans, H. Hristov, D. Maes, K. Gadeyne // In IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, no 10. P. 13–18. doi: 10.1016/j.ifacol.2022.09.361.

2. Knowledge Graphs // A. Hogan, E. Blomqvist, M. Cochez, C. d'Amato, G. de Melo, C. Gutierrez, S. Kirrane, J. Labra Gayo, R. Navigli, S. Neumaier, A.-C. Ngonga Ngomo, A. Polleres, S. Rashid, A. Rula, L. Schmelzeisen, J. Sequeda, S. Staab, A. Zimmermann // ACM Comp. Surv. 2021. Vol. 54. P. 1–37. doi:10.1145/3447772.

3. Automated domain-specific healthcare knowledge graph curation framework: Subarachnoid hemorrhage as phenotype // Kh. M. Malik, M. Krishnamurthy, M. Alobaidi, M. Hussain, F. Alam, G. Malik // Expert Syst. with Appl. 2020. Vol. 145. P. 113120. doi:10.1016/j.eswa.2019.113120.

4. Synthesis of multilevel knowledge graphs: Methods and technologies for dynamic networks / T. Man, A. Vodyaho, D. I. Ignatov, I. Kulikov, N. Zhukova // Engin. Appl. of Artificial Intelligence. 2023, Vol. 123. P. 106244. doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106244.

5. Common format and MIME type for Comma-Separated Values (CSV) Files. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4180> (data obraschenija: 12.05.2025).

6. RDF 1.1 XML Syntax. URL: <https://www.w3.org/TR/rdf-syntax-grammar/> (data obraschenija: 12.05.2025).

7. SPARQL 1.1 Overview. W3C Recommendation 21.03.2013. URL: <https://www.w3.org/TR/2013/REC-sparql11-overview-20130321> (data obraschenija: 12.05.2025).

8. Ishodnyj kod programmnoho kompleksa induktivnogo sinteza modelej strukturno slozhnyh dinamicheskikh setej v forme grafa znaniy URL: <https://github.com/kulikovia/KG4CDO> (data obrashhenija: 22.03.2025). (In Russ.).

---

#### Information about the author

**Igor A. Kulikov** – Assistant of the Department of Software Engineering and Computer Applications, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [i.a.kulikov@gmail.com](mailto:i.a.kulikov@gmail.com)

<http://orcid.org/0000-0002-2532-5579>

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; принята к публикации после рецензирования 28.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025.

Submitted 01.04.2025; accepted 28.05.2025; published online 29.09.2025.

---