Разработка графовой модели данных для управления цифровыми двойниками объектов промышленной инфраструктуры

Трапезников Михаил Андреевич
студент, РГПУ им. Герцена, misha.trap@mail.ru

Цифровые двойники являются важным инструментом цифровой трансформации промышленности, обеспечивая представление объектов инфраструктуры, их характеристик, взаимосвязей и текущего состояния в едином информационном пространстве. При построении цифровых двойников возникает задача хранения большого объема взаимосвязанных данных, описывающих оборудование, датчики, события и историю изменения состояния объектов.

В работе предложена графовая модель данных, предназначенная для представления цифровых двойников объектов промышленной инфраструктуры. Особенностью модели является совместное хранение структуры объекта и истории его состояний в рамках единого графа за счет использования специализированных вершин состояния и отношений, отражающих последовательность изменений во времени. Предлагаемый подход позволяет организовать хранение взаимосвязанных данных цифрового двойника и выполнять анализ структуры объекта и его состояния средствами графовой модели.

Ключевые слова: цифровой двойник, графовая модель данных, графовая база данных, промышленная инфраструктура, цифровое моделирование, граф.

Введение

Развитие концепции цифровых двойников является одним из ключевых направлений цифровой трансформации промышленности. Современные предприятия используют цифровые модели оборудования и технологических процессов для мониторинга состояния объектов, анализа их функционирования и поддержки принятия управленческих решений. Эффективность таких систем во многом определяется способом организации хранения и обработки данных [7, 8, 10].

Цифровой двойник промышленного объекта представляет собой совокупность взаимосвязанных данных, включающих описание оборудования, сведения о его составе, пространственном расположении, средствах измерения, зарегистрированных событиях и истории изменения состояния [8, 10]. По мере увеличения количества объектов и связей между ними возрастают требования к модели хранения данных, которая должна обеспечивать целостность представления информации и возможность анализа взаимосвязанных элементов [3, 7].

Традиционно для хранения данных цифровых двойников применяются реляционные базы данных. Однако представление сложных структур промышленной инфраструктуры в реляционной модели требует использования большого количества связанных таблиц и операций соединения, что усложняет формирование запросов при анализе взаимосвязей между объектами [5, 9].

Одним из перспективных направлений является использование графовых моделей данных, в которых объекты представлены вершинами графа, а отношения между ними – ориентированными ребрами. Такой подход позволяет естественным образом описывать взаимосвязанные структуры и выполнять их анализ посредством обхода графа [5, 9, 11].

Целью работы является разработка графовой модели данных для представления цифровых двойников объектов промышленной инфраструктуры, обеспечивающей совместное хранение структуры объекта и истории изменения его состояний.

Научная новизна работы заключается в разработке графовой модели представления цифрового двойника промышленного объекта, предусматривающей хранение последовательности состояний оборудования в виде специализированных вершин, связанных между собой временными отношениями, что позволяет объединить структурные и динамические данные в рамках единой модели.

Анализ существующих подходов к хранению данных цифровых двойников

При проектировании цифровых двойников используются различные модели хранения данных, выбор которых определяется структурой объекта, требованиями к обработке информации и характером взаимосвязей между элементами системы [5, 9].

Наиболее распространенным подходом является использование реляционных баз данных. Данный подход обеспечивает надежное хранение информации и поддержку транзакционной обработки данных. Вместе с тем описание промышленной инфраструктуры, включающей большое количество взаимосвязанных объектов, приводит к формированию сложной структуры таблиц, связанных внешними ключами. Анализ цепочек взаимосвязей между объектами в этом случае требует использования нескольких операций соединения [5].

Документно-ориентированные базы данных обеспечивают более гибкое представление информации за счет хранения объектов в виде документов с изменяемой структурой. Такой подход упрощает расширение состава атрибутов оборудования, однако не предназначен для эффективного анализа сложных сетевых взаимосвязей между объектами [5].

В графовых базах данных объекты представляются вершинами, а отношения между ними – ребрами графа. Такая модель данных позволяет естественным образом описывать структуру промышленного объекта и выполнять поиск связанных элементов посредством обхода графа. Благодаря этому графовые модели находят применение при разработке информационных систем, ориентированных на представление сложных взаимосвязанных объектов [1, 9, 11].

Сравнение наиболее распространенных моделей хранения данных приведено в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, каждая модель данных имеет свои особенности и область применения. При этом графовый подход наиболее естественно подходит для хранения взаимосвязанных объектов промышленной инфраструктуры. Вместе с тем анализ существующих решений показывает, что история изменения состояния оборудования нередко рассматривается отдельно от структурной модели объекта, что усложняет совместный анализ структуры и динамики его функционирования.

В связи с этим актуальной является разработка графовой модели, обеспечивающей представление объектов промышленной

инфраструктуры и истории изменения их состояний в рамках единой структуры данных [2, 3, 6].

Таблица 1
Сравнение моделей хранения данных цифровых двойников

Характеристика	Реляционная	Документная	Графовая
Представление объектов	Таблицы	Документы	Вершины
Представление связей	Внешние ключи	Ссылки	Ребра
Изменение структуры данных	Ограниченное	Гибкое	Гибкое
Анализ взаимосвязей	JOIN-запросы	Обработка ссылок	Обход графа
Представление сложных сетевых структур	Ограниченное	Частичное	Естественное

Постановка задачи

Проведенный анализ существующих подходов показал, что при разработке цифровых двойников промышленной инфраструктуры возникает необходимость совместного хранения информации о составе объекта, взаимосвязях между его элементами и истории изменения их состояний. В существующих решениях такие данные нередко распределяются между различными структурами хранения, что усложняет получение комплексной информации о состоянии объекта и связанных с ним элементах [2, 3, 4].

В связи с этим задачей исследования является разработка графовой модели данных, обеспечивающей представление объектов промышленной инфраструктуры, их взаимосвязей и последовательности состояний в рамках единой структуры данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

определить основные сущности цифрового двойника промышленного объекта;

разработать структуру графовой модели и определить типы связей между ее элементами;

обеспечить хранение истории изменения состояния оборудования;

разработать алгоритм получения информации о состоянии объекта и связанных с ним элементах.

Результатом исследования является графовая модель данных, предназначенная для использования при разработке информационных систем мониторинга и управления промышленной инфраструктурой.

Предлагаемая графовая модель данных

Предлагаемая модель основана на представлении цифрового двойника в виде ориентированного графа, вершины которого описывают объекты промышленной инфраструктуры и связанные с ними сущности, а ребра определяют отношения между ними [2, 3, 6].

Формально модель представляется ориентированным графом

$$G=(V,E),\#(1)$$

где:

V – множество вершин графа;

E – множество ориентированных ребер.

В графовой модели используются четыре типа вершин: **Object**, **State**, **Sensor** и **Event**. Основные характеристики вершин приведены в таблице 2.

Таблица 2
Типы вершин графовой модели

Тип вершины	Основные атрибуты	Назначение
Object	id, name, type	Представление объекта промышленной инфраструктуры
State	timestamp, status	Представление состояния объекта в определенный момент времени
Sensor	id, type	Представление датчика или источника измерений
Event	id, severity, timestamp	Представление зарегистрированного события

Как следует из таблицы 2, каждая вершина соответствует определенной сущности цифрового двойника и содержит набор атрибутов, необходимых для ее описания.

Множество связей графовой модели определяется выражением

E = {CONNECTED_TO, HAS_STATE, PREVIOUS_STATE, MEASURED_BY, GENERATES},

где каждая связь определяет тип отношения между вершинами графа. Основные типы связей представлены в таблице 3.

Таблица 3
Типы связей графовой модели

Связь	Источник	Приемник	Назначение
CONNECTED_TO	Object	Object	Связь между объектами промышленной инфраструктуры
HAS_STATE	Object	State	Связь объекта с его состоянием
PREVIOUS_STATE	State	State	Связь между последовательными состояниями объекта
MEASURED_BY	Object	Sensor	Связь объекта с датчиком
GENERATES	State	Event	Регистрация события для определенного состояния объекта

Структура предложенной графовой модели представлена на рисунке 1.

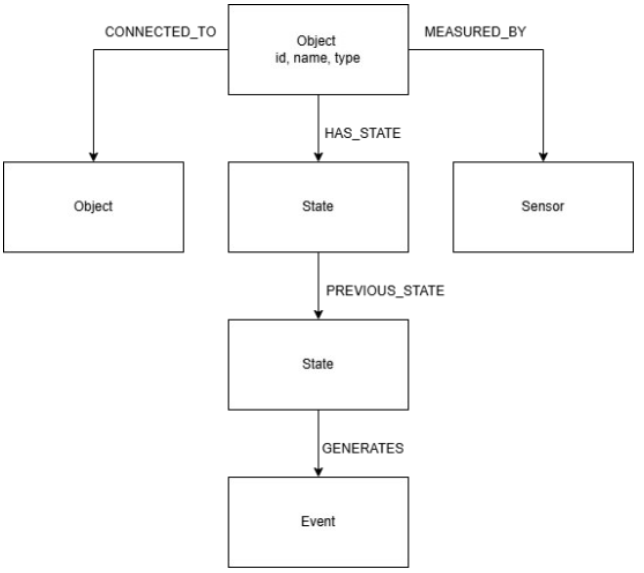


Рисунок 1 – Структура предлагаемой графовой модели данных

Как показано на рисунке 1, объект промышленной инфраструктуры может быть связан с другими объектами, иметь одно или несколько состояний, а также ассоциированные датчики. Последовательность изменения состояния оборудования формируется связями **PREVIOUS_STATE**, а события связываются с тем состоянием объекта, при котором они были зарегистрированы [3, 11].

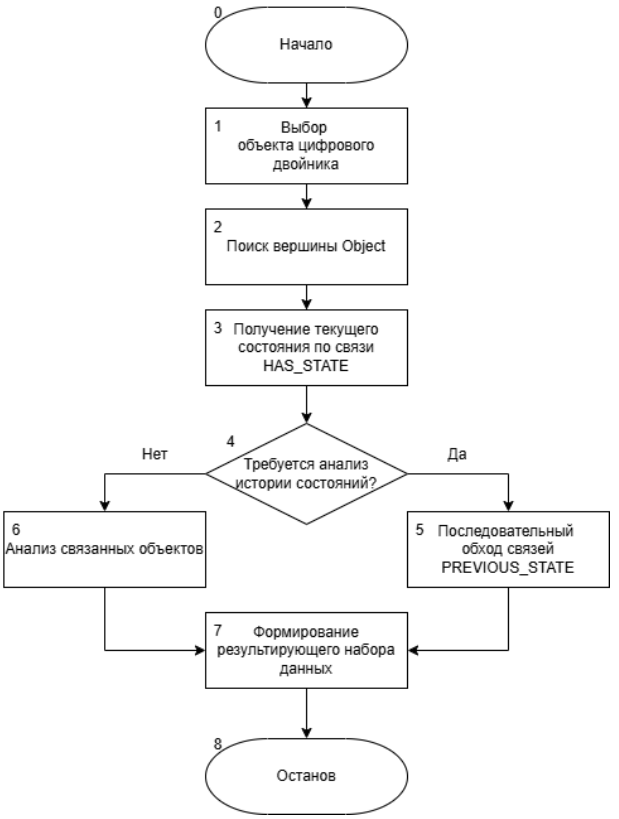


Рисунок 2 – Алгоритм получения информации о состоянии объекта

Алгоритм работы модели

Разработанная графовая модель предназначена для получения информации о состоянии объектов промышленной инфраструктуры и анализа их взаимосвязей. Последовательность обработки запроса представлена на рисунке 2.

Как показано на рисунке 2, выполнение запроса начинается с поиска вершины **Object**, соответствующей выбранному объекту цифрового двойника. После этого по связи **HAS_STATE** определяется его актуальное состояние.

При необходимости анализа истории эксплуатации осуществляется последовательный обход вершин **State**, соединенных связями **PREVIOUS_STATE**. Дополнительно выполняется получение сведений о связанных объектах и датчиках посредством связей **CONNECTED_TO** и **MEASURED_BY**. Если для рассматриваемого состояния зарегистрированы события, они извлекаются по связи **GENERATES**.

Результатом выполнения алгоритма является подграф, содержащий сведения о выбранном объекте, его текущем состоянии, истории изменений и связанных сущностях цифрового двойника.

Результаты моделирования и сравнительный анализ

Для проверки работоспособности предложенной модели было выполнено моделирование фрагмента промышленной инфраструктуры, включающего объекты оборудования, датчики, события и историю изменения их состояний. Основные характеристики сформированной модели приведены в таблице 4.

Таблица 4
Характеристики тестовой модели

Параметр	Значение
Объекты оборудования	5
Датчики	7
Зарегистрированные события	12
Вершины состояния	28
Типы связей	6

Как видно из таблицы 4, тестовая модель содержит основные сущности, необходимые для представления цифрового двойника промышленного объекта, и позволяет продемонстрировать работу предложенной структуры данных.

В ходе моделирования были выполнены следующие операции:

получение актуального состояния объекта;

просмотр последовательности состояний оборудования;

определение объектов, связанных с выбранным элементом;

получение сведений о датчиках и зарегистрированных событиях.

Результаты моделирования показали возможность совместного представления структуры объекта и истории изменения его состояния в рамках единой графовой модели. При добавлении нового состояния изменяется только содержимое графа за счет создания новой вершины **State**, при этом структура модели остается неизменной.

Для оценки особенностей предложенного подхода выполнено его сравнение с традиционной реляционной моделью хранения данных. Основные результаты сравнения представлены в таблице 5.

Таблица 5
Сравнение моделей хранения данных

Критерий	Реляционная модель	Предлагаемая графовая модель
Представление объектов	Таблицы	Вершины
Представление связей	Внешние ключи	Ребра графа
Хранение истории состояний	Отдельные записи	Вершины **State**
Анализ взаимосвязей	JOIN-запросы	Обход графа
Добавление нового состояния	Добавление записи	Добавление вершины

Как следует из таблицы 5, различие между моделями заключается прежде всего в способе представления взаимосвязей между объектами и организации хранения истории их состояний. Предлагаемая графовая модель ориентирована на представление взаимосвязанных сущностей цифрового двойника и может использоваться при разработке информационных систем, в которых требуется анализ структуры объекта и последовательности изменения его состояния.

Заключение

В работе разработана графовая модель данных для представления цифровых двойников объектов промышленной инфраструктуры. Предложенная модель позволяет описывать объекты, их взаимосвязи, средства измерения, зарегистрированные события и последовательность состояний в рамках единой структуры данных.

В отличие от традиционного представления истории эксплуатации оборудования в виде отдельных записей, предложенный подход предусматривает использование специализированных вершин **State**, связанных отношением **PREVIOUS_STATE**, что обеспечивает последовательное хранение изменений состояния объекта без изменения структуры модели.

В ходе работы выполнено моделирование фрагмента промышленной инфраструктуры, подтвердившее возможность применения разработанной модели для представления структуры объекта, получения сведений о его текущем состоянии и анализа взаимосвязанных элементов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке информационных систем мониторинга и управления промышленными объектами, основанных на применении графовых баз данных. Перспективным направлением дальнейших исследований является реализация предложенной модели в графовой системе управления базами данных и оценка ее применения на промышленных наборах данных.

Литература

1. A graph database for life cycle inventory using Neo4j [Электронный ресурс]. URL: https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/lRmKoee4/ (дата обращения: 20.06.2026).
2. A graph-based knowledge representation and pattern mining supporting the Digital Twin creation of existing manufacturing systems [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2209.10258 (дата обращения: 20.06.2026).
3. A proposed systems-centric ontology for a graph-based digital twin [Электронный ресурс]. URL: https://ec-3.org/publication/ec32023_229/ (дата обращения: 21.06.2026).
4. Automated digital twin generation of manufacturing systems with complex material flows: graph model completion [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361523001276 (дата обращения: 20.06.2026).
5. Demystifying Graph Databases: Analysis and Taxonomy of Data Organization, System Designs, and Graph Queries [Электронный ресурс]. URL: https://cir.nii.ac.jp/crid/1360017677210000128 (дата обращения: 22.06.2026).
6. Digital Twin Graph: Automated Domain-Agnostic Construction, Fusion, and Simulation of IoT-Enabled World (Digital Twin Graph) [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2304.10018 (дата обращения: 22.06.2026).
7. From framework to industrial implementation: the digital twin in process planning [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-023-02268-0 (дата обращения: 20.06.2026).
8. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2021.
9. The World of Graph Databases from An Industry Perspective [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2211.13170 (дата обращения: 21.06.2026).
10. Towards Ontologizing a Digital Twin Framework for Manufacturing [Электронный ресурс]. URL: https://www.nist.gov/publications/towards-ontologizing-digital-twin-framework-manufacturing (дата обращения: 21.06.2026).
11. What is graph data modeling? – Getting Started [Электронный ресурс]. URL: https://neo4j.com/docs/getting-started/data-modeling/ (дата обращения: 20.06.2026).

Development of a graph data model for managing digital counterparts of industrial infrastructure facilities

Trapeznikov M.A.
Herzen Russian State Pedagogical University

JEL classification: C01, C02, C1, C4, C5, C6, C8

Digital twins are an important tool for the digital transformation of industry, providing a representation of infrastructure facilities, their characteristics, relationships and status in a single information space. When building digital twins, the task arises of storing a large amount of interconnected data describing equipment, sensors, events, and the history of changes in the state of objects.

The paper proposes a graph data model designed to represent digital counterparts of industrial infrastructure facilities. A feature of the model is the joint storage of the object structure and the history of its states within a single graph using specialized vertices of the state and relationships reflecting the sequence of changes over time. The proposed approach makes it possible to organize the storage of interconnected digital twin data and analyze the structure of an object and its state using a graph model.

Keywords: digital twin, graph data model, graph database, industrial infrastructure, digital modeling, graph.

References

1. A graph database for life cycle inventory using Neo4j [Electronic resource]. URL: https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/lRmKoee4 / (accessed: 06/20/2026).
2. A graph-based knowledge representation and pattern mining supporting the Digital Twin creation of existing manufacturing systems [Electronic resource]. URL: https://arxiv.org/abs/2209.10258 (accessed: 06/20/2026).
3. A proposed systems-centric ontology for a graph-based digital twin [Electronic resource]. URL: https://ec-3.org/publication/ec32023_229 / (date of access: 06/21/2026).
4. Automated digital twin generation of manufacturing systems with complex material flows: graph model completion [Electronic resource]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361523001276 (accessed: 06/20/2026).
5. Demystifying Graph Databases: Analysis and Taxonomy of Data Organization, System Designs, and Graph Queries [Electronic resource]. URL: https://cir.nii.ac.jp/crid/1360017677210000128 (date of request: 06/22/2026).