

## Сравнительный анализ продукционно-модульного подхода и классических онтологических моделей при синтезе геометрических объектов

Е. С. Бондаренко, А. В. Григорьев

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
E-mail: kate.bond777@gmail.ru, grigorievalvl@gmail.com

### Аннотация

В статье представлен сравнительный анализ продукционно-модульного подхода и классических онтологических моделей при решении задач геометрического синтеза. Рассмотрены особенности представления знаний, организации логического вывода и обработки зависимостей в обоих подходах. Выявлены ограничения онтологического подхода, обусловленные отсутствием процедурных механизмов и управления последовательностью действий. Обоснована эффективность применения продукционно-модульного подхода и возможность повышения автоматизации проектирования.

### Введение

В последние годы задачи синтеза геометрических объектов в системах автоматизированного проектирования активно исследуются в рамках интеллектуальных и гибридных подходов. Их решение имеет важное значение для повышения уровня автоматизации проектирования, снижения трудоёмкости разработки и повышения точности построения моделей [1, 2].

Особое внимание уделяется использованию онтологических моделей, позволяющих формализовать предметную область и описывать знания о геометрических объектах и их взаимосвязях [1]. Вместе с тем, развитие интеллектуальных систем требует не только декларативного описания знаний, но и эффективной реализации процедур построения объектов.

В этой связи возникает необходимость анализа существующих подходов к представлению знаний и организации процесса геометрического синтеза, а также определения их возможностей и ограничений [2, 3].

### Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] предложено использование ансамбля онтологий для описания технологических процессов, что позволяет структурировать знания о геометрических объектах и их взаимосвязях. Аналогичные подходы рассматриваются в [2], где анализируются методы автоматизации работы с онтологическими ресурсами.

В работах [3, 4] отмечается, что онтологические модели эффективно описывают структуру объектов, однако не обеспечивают

явного представления последовательности операций построения, что ограничивает их применение в задачах синтеза.

Альтернативное направление связано с использованием продукционных и модульных моделей. В [5] рассматриваются методы повышения эффективности продукционных систем, а в [6] предложен модульный подход к представлению проектных решений.

Несмотря на наличие значительного количества исследований, вопрос сравнительной эффективности онтологического и продукционно-модульного подходов при решении задач геометрического синтеза остаётся недостаточно изученным, что определяет актуальность данной работы.

Научная новизна работы заключается в формализованном сравнении онтологического и продукционно-модульного подходов с использованием интегральной метрики эффективности, что позволяет перейти от качественного анализа к количественной оценке.

### Общая постановка проблемы

Задачи геометрического синтеза заключаются в построении геометрических объектов на основе заданных исходных данных и ограничений и широко применяются в системах автоматизированного проектирования, компьютерной графике и интеллектуальных системах [6, 7].

Формально задачу синтеза можно представить в виде отображения согласно формуле (1):

$$G:(D,C)\rightarrow O, \quad (1)$$

где  $D$  – множество исходных данных;

$C$  – множество ограничений;

$O$  – множество результирующих объектов.

Процесс построения объекта носит процедурный характер и может быть представлен как композиция операций согласно формуле (2):

$$G = f_n \circ f_{n-1} \circ \dots \circ f_1, \quad (2)$$

где  $f_1, f_2, \dots, f_n$  – элементарные операции построения геометрического объекта;

$n$  – количество этапов синтеза;

$\circ$  – операция композиции функций, отражающая последовательное выполнение шагов построения.

Такое представление отражает алгоритмическую природу задачи синтеза, где каждая функция соответствует отдельному этапу построения, а их композиция определяет общий процесс формирования геометрического объекта [8]. При этом нарушение порядка выполнения операций может привести к невозможности построения корректного решения, что подчёркивает важность управления последовательностью действий [5].

Для решения задачи синтеза требуется формализованное представление знаний о геометрических объектах и их взаимосвязях. В качестве средств формализации знаний часто используются онтологические модели, позволяющие описывать предметную область через классы, отношения и аксиомы [1, 2]:

$$O = (T, R, A), \quad (3)$$

где  $T$  – множество понятий (классов) предметной области;

$R$  – множество отношений между понятиями;

$A$  – множество аксиом и ограничений, задающих правила интерпретации и использования знаний.

Таким образом, онтологическая модель обеспечивает декларативное описание предметной области, однако не задаёт явным образом процедурные аспекты преобразования знаний, что ограничивает её применение в задачах, требующих динамического построения объектов [3].

Однако в задачах геометрического синтеза возникает необходимость не только описания структуры объектов, но и задания процесса их построения. Это приводит к ограниченности применения классических онтологий и стимулирует развитие альтернативных подходов, включая продукционно-модульные модели [1].

Продукционно-модульный подход – подход, основанный на правилах, рабочей памяти и механизме логического вывода. [3].

Таким образом, целью работы является выполнение сравнительного анализа продукционно-модульного подхода и

классических онтологических моделей при синтезе геометрических объектов. В частности, предполагается выполнение следующих задач:

- выполнить анализ продукционно-модульного подхода и классических онтологических моделей при решении задач геометрического синтеза;

- рассмотреть особенности представления знаний и организации вывода в подходах;

- выявить ограничения подходов;

- вычислить эффективность применения подходов при построении объекта;

- обосновать целесообразность применения определенного подхода в задачах геометрического синтеза.

### Исследования

Классический онтологический подход основан на декларативном представлении знаний и обеспечивает формализацию предметной области через структуру классов, отношений и ограничений [3, 6, 8].

Преимуществами онтологического подхода являются:

- высокая степень формализации знаний;

- возможность логического вывода;

- независимость от конкретной реализации.

Вместе с тем, в рамках данного подхода отсутствуют встроенные механизмы описания алгоритмических процедур, что затрудняет его применение в задачах, требующих пошагового построения объектов. Кроме того, управление последовательностью выполнения операций остаётся неявным и требует использования дополнительных средств или внешних систем.

Продукционно-модульный подход представляет собой развитие продукционных систем, в которых знания задаются в виде правил вида [3]:

$$IF \text{ condition } THEN \text{ action}. \quad (4)$$

В контексте геометрического синтеза продукционно-модульная модель может быть представлена как:

$$M = (S, P, Mod), \quad (5)$$

где  $S$  – состояние системы;

$P$  – множество продукционных правил;

$Mod$  – набор модулей, реализующих вычислительные и логические операции.

Особенностью подхода является [5]:

- явное представление процедур построения;

- возможность управления последовательностью выполнения;

- интеграция с вычислительными методами.

Дополнительно следует отметить, что модульная организация позволяет повышать расширяемость системы за счёт повторного использования отдельных компонентов и упрощает адаптацию модели к различным типам задач синтеза.

Это делает его более пригодным для решения задач синтеза по сравнению с классическими онтологиями.

В связи с этим возникает необходимость формализованного сравнения рассматриваемых подходов. Для проведения сравнительного анализа выделим ключевые требования к системам синтеза:

- представление структуры объектов;
- описание процессов построения;
- управление последовательностью действий;

- учёт зависимостей;
- выполнение вычислений;
- масштабируемость;
- эффективность вывода.

Эти требования используются в качестве критериев сравнения рассматриваемых подходов.

Выделенные критерии сформированы на основе анализа требований к интеллектуальным системам геометрического синтеза, а также с учётом существующих подходов к оценке эффективности систем представления знаний [5, 8]. Каждый критерий отражает отдельный аспект функционирования системы и позволяет провести комплексное сравнение рассматриваемых подходов. Результаты анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ подходов

Критерий	Онтологический подход	Продукционно-модульный подход
Представление структуры	Высокое	Высокое
Представление процессов	Ограничено	Полное
Управление последовательностью	Отсутствует	Реализовано
Учёт зависимостей	Частично	Полное
Вычислительные возможности	Ограничены	Полные
Масштабируемость	Ограничена	Высокая
Эффективность	Средняя	Высокая

Анализ показывает, что классические онтологии эффективны при описании структуры предметной области, однако уступают продукционно-модульному подходу, представляющему собой расширение классических онтологий, при решении задач, требующих процедурного описания.

Однако табличное представление не в полной мере отражает различия в организации обработки знаний. Для более наглядного представления различий рассмотрим архитектурные особенности подходов, представленные на рис. 1.

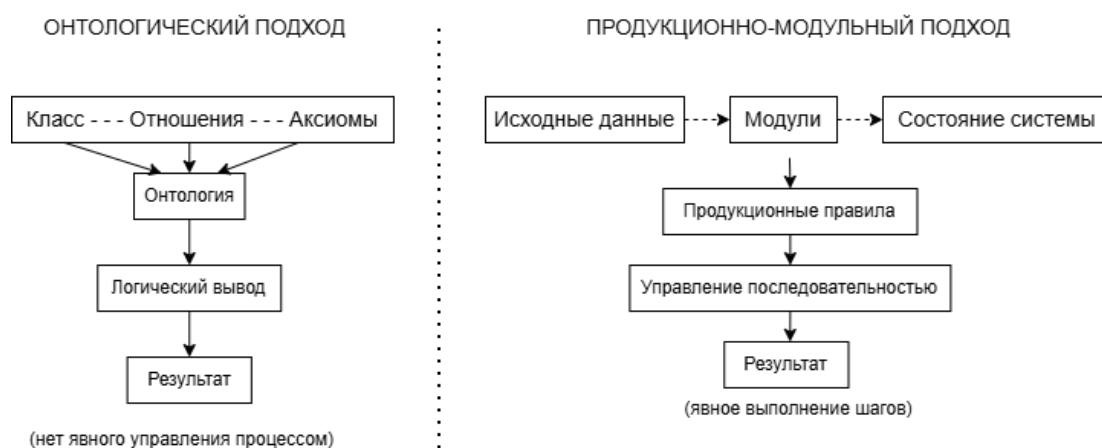


Рисунок 1 – Сравнение архитектур подходов

Как видно из рисунка 1, в онтологическом подходе основное внимание уделяется представлению структуры знаний и логическому выводу на основе аксиом. При этом отсутствует явный механизм управления

последовательностью выполнения операций, сгруппированных в систему иерархических модулей, что затрудняет использование данного подхода в задачах геометрического синтеза.

В продукционно-модульном подходе, напротив, реализуется явное управление процессом построения за счёт использования модульной организации базы знаний [2, 6].

Таким образом, различия в архитектуре определяют различия в функциональных возможностях подходов, что подтверждает результаты сравнительного анализа.

Несмотря на полученные теоретические различия, важно проиллюстрировать их на конкретном примере задачи геометрического синтеза. Рассмотрим задачу построения треугольника по трём сторонам. Процесс синтеза может быть представлен в виде ориентированного графа зависимостей (рис. 2).

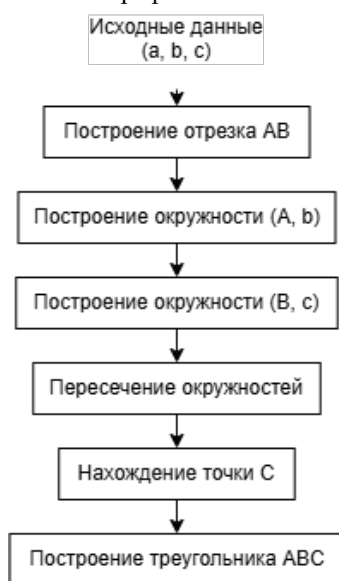


Рисунок 2 – Граф зависимостей операций геометрического синтеза

Представленный граф демонстрирует зависимость этапов построения геометрического объекта. Каждый последующий шаг возможен только после выполнения предыдущего, что отражает строгую последовательность операций.

Онтологический подход не обеспечивает явного представления подобных зависимостей и порядка выполнения действий, поскольку ориентирован на описание статических связей между объектами [3]. В отличие от этого, продукционно-модульный подход позволяет напрямую моделировать такие графы в виде последовательности правил и состояний системы.

Для более детального сравнения рассмотрим особенности реализации данной задачи в рамках каждого подхода.

В онтологическом подходе [5, 7]:

- задаются классы и ограничения;
- отсутствует механизм построения.

В продукционно-модульном подходе:

- IF заданы стороны → построить базовый отрезок;

- IF известны длины → построить окружности;

- IF есть пересечение → определить вершину.

Проведённый сравнительный анализ показывает, что:

- онтологии эффективны для структурного описания знаний;
- продукционно-модульный подход более пригоден для процедурных задач;
- комбинирование подходов может дать наилучший результат.

Однако представленные результаты носят качественный характер и не позволяют выполнить формализованное сравнение подходов. В связи с этим вводится интегральная метрика эффективности, позволяющая количественно оценить уровень соответствия каждого подхода заданным критериям. Предложенная метрика основана на методе взвешенной суммы критериев, широко применяемом при многокритериальной оценке сложных систем [9].

Для количественной оценки эффективности онтологического и продукционно-модульного подходов введём интегральную метрику, учитывающую ключевые характеристики систем геометрического синтеза.

Эффективность определяется как:

$$E = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i, \quad (6)$$

где  $n$  – количество критериев оценки;

$k_i$  – нормированное значение  $i$ -го критерия, полученное на основе экспертной оценки и анализа функциональных возможностей подхода,  $k_i \in [0,1]$ ;

$w_i$  – весовой коэффициент, отражающий значимость критерия, ( $\sum w_i = 1$ ).

Для практического применения введённой метрики необходимо определить критерии оценки. В качестве критериев выберем:

- $k_1$  – полнота представления процессов;
- $k_2$  – управляемость последовательности действий;
- $k_3$  – поддержка вычислений;
- $k_4$  – масштабируемость;
- $k_5$  – вычислительная эффективность.

Для исключения субъективного перекоса приняты равные веса:  $w_i = 0,2$ .

Выбор данных критериев обусловлен тем, что они отражают ключевые аспекты функционирования систем представления знаний в задачах геометрического синтеза: структурную выразительность, процедурную управляемость, вычислительную реализуемость и масштабируемость.

На основе сравнительного анализа введены следующие значения критериев, представленные в табл. 2:

Таблица 2 – Критерии подходов

Критерий	Онтологический подход	Продукционный-модульный
$k_1$	0,4	0,85
$k_2$	0,3	0,9
$k_3$	0,3	0,8
$k_4$	0,5	0,75
$k_5$	0,45	0,7

Значения критериев  $k_i$  определены в нормированном виде на основе качественного анализа функциональных возможностей рассматриваемых подходов, представленного в предыдущих разделах. Следует отметить, что полученные значения носят обобщенный характер и отражают типичные свойства рассматриваемых подходов. Приведенные значения могут уточняться в зависимости от конкретной постановки задачи и особенностей реализации моделей. На основе значений, представленных в таблице 2, выполняется расчет интегральной эффективности по формуле (6).

Эффективность онтологического подхода:

$$E = 0,2 \cdot (0,4 + 0,3 + 0,3 + 0,5 + 0,45) = 0,39.$$

Эффективность продукционно-модульного подхода:

$$E = 0,2 \cdot (0,85 + 0,9 + 0,8 + 0,75 + 0,7) = 0,80.$$

Полученные значения позволяют провести сравнительный анализ эффективности. Разница эффективности составляет:

$$\Delta E = 0,80 - 0,39 = 0,41.$$

Полученные значения интегральной эффективности позволяют сделать вывод о количественном превосходстве продукционно-модульного подхода. При этом использование равных весов критериев обеспечивает нейтральность оценки и исключает доминирование отдельных характеристик, что повышает объективность сравнительного анализа [9, 10]. Полученный результат показывает, что продукционно-модульный подход демонстрирует более высокую эффективность, однако различие не является абсолютным, что подтверждает целесообразность совместного использования подходов. Преимущество продукционно-модульной модели обусловлено [2]:

- возможностью явного представления процедур синтеза;
- управлением последовательностью выполнения операций;
- интеграцией с вычислительными методами.

В то же время онтологический подход сохраняет значимость при структурировании предметной области, что делает перспективным их комбинирование. Следует отметить, что

проведенное исследование имеет ряд ограничений, связанных с использованием экспертных оценок и усредненных значений критериев, что может влиять на точность количественных результатов. Кроме того, рассмотренные значения параметров отражают обобщенные характеристики подходов и могут варьироваться в зависимости от конкретной реализации.

## Выводы

В работе проведен сравнительный анализ классического онтологического и продукционно-модульного подходов в задачах геометрического синтеза. Показано, что классические онтологические модели обладают ограниченной выразительностью при описании процессов построения графических объектов, поскольку ориентированы преимущественно на декларативное представление знаний. Установлено, что продукционно-модульный подход обеспечивает более полное представление процедурных знаний, а также эффективное управление последовательностью выполнения операций синтеза. Проведенный качественный и количественный анализ подтвердил, что продукционно-модульный подход демонстрирует более высокую эффективность по сравнению с классическим онтологическим, что обусловлено возможностью явного задания алгоритмов построения, учетом зависимостей между этапами и интеграцией с вычислительными процедурами. При этом показано, что онтологический подход сохраняет значимость при структурировании предметной области и формализации знаний о геометрических объектах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования продукционно-модульных моделей как модификации онтологического подхода при решении задач геометрического синтеза. Такой подход обеспечивает объединение декларативных и процедурных механизмов представления знаний, что является важным условием повышения эффективности интеллектуальных систем данного класса.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной интегральной метрики для выбора архитектуры интеллектуальных систем геометрического синтеза на этапе проектирования. Разработанный подход позволяет обоснованно сравнивать онтологические и продукционно-модульные модели, а также использовать полученные результаты при создании гибридных систем автоматизированного проектирования.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой технологии построения графических моделей на базе продукционно-

модульного подхода, а также - с расширением предложенной метрики за счёт учёта вычислительной сложности алгоритмов и характеристик конкретных прикладных задач.

### Литература

1. Григорьев, А.В., Павловский Е.В. Анализ методов построения онтологий для построения экспертных систем по синтезу моделей сложных систем в САПР. / Наукові праці національного технічного університета. Серія "Обчислювальна техніка та автоматизація". Випуск 21 (183): Донецьк: ДонНТУ, 2011. - С. 87-94.
2. Шищенко, М.А. Подходы к автоматизации работ с онтологическими ресурсами // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 256–269.
3. Кутелёв, Р.С., Пахота М.И., Григорьев А.В. Анализ редакторов онтологий с точки зрения представления классов и продукционных правил // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2020). – Донецк, 2020. – С. 21–27.
4. Бондаренко, Е.С., Григорьев А.В. Механизм логического вывода как основа создания шаблонов проектирования //

Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение. – Донецк, 2022. – С. 96–101.

5. Гурин, А.Г., Григорьев А.В. Сравнительный анализ методов повышения эффективности производственных систем для работы с большими данными // Проблемы искусственного интеллекта. – 2025. – № 4.
6. Григорьев, А.В. Модульный подход к представлению моделей методик проектирования в интеллектуальных САПР // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2018). – 2018. – С. 269–273.
7. Жукова, Н.А., Ковалевский В.Э. Метаалгоритм управления процессами синтеза моделей машинного обучения // Информационно-управляющие системы. – 2025. – № 6. – С. 28–41.
8. Gruber T.R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing // International Journal of Human-Computer Studies. – 1995. – Vol. 43, No. 5–6. – P. 907–928.
9. Russell, S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – 4th ed. – Pearson, 2021. – 1152 p.
10. van Harmelen F., Lifschitz V., Porter B. Handbook of Knowledge Representation. – Elsevier, 2008. – 1035 p.

**Бондаренко Е.С., Григорьев А.В. Сравнительный анализ производственно-модульного подхода и классических онтологических моделей при синтезе геометрических объектов.** В статье представлен сравнительный анализ производственно-модульного подхода и классических онтологических моделей при решении задач геометрического синтеза. Рассмотрены особенности представления знаний, организации логического вывода и обработки зависимостей в обоих подходах. Выявлены ограничения онтологического подхода, обусловленные отсутствием процедурных механизмов и управления последовательностью действий. Обоснована эффективность применения производственно-модульного подхода и возможность повышения автоматизации проектирования.

**Ключевые слова:** онтологии, геометрический синтез, производственные системы, представление знаний, вычислительная геометрия, гибридные модели.

**Bondarenko E.S., Grigoriev A.V. Comparative Analysis of the Production-Module Approach and Classical Ontological Models in the Synthesis of Geometric Objects.** This paper presents a comparative analysis of the production-modular approach and classical ontological models in solving geometric synthesis problems. The study examines the features of knowledge representation, organization of logical inference, and dependency processing in both approaches. The limitations of the ontological approach are identified, primarily due to the lack of procedural mechanisms and control over the sequence of actions. The effectiveness of the production-modular approach is substantiated, along with its potential to enhance the automation of design processes. The feasibility of using the production-module approach in geometric synthesis problems is substantiated.

**Keywords:** ontologies, geometric synthesis, production systems, knowledge representation, computational geometry, and hybrid models.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025  
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.