

А.Г. Гурин, А.В. Григорьев
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, ул. Артёма, 58

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАБОТЫ С БОЛЬШИМИ ДАННЫМИ. КОМБИНАЦИЯ ДВУХ ПОДХОДОВ

A.G. Gurin, A.V. Grigoriev
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical
University" 283001, Donetsk People's Republic, Donetsk, st. Artyoma, 58.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF PRODUCTION SYSTEMS FOR BIG DATA PROCESSING

Проведен анализ логического вывода в производственных системах для задач обработки больших данных. Несмотря на эффективность классических производственных систем, недостаточно изученной остается комбинация двух подходов: использование И-ИЛИ-деревьев для наглядного представления логики и применение тензорных представлений для повышения производительности. Исследование демонстрирует взаимодополняемость данных подходов, что обосновывает возможность создания адаптивного мета-алгоритма, динамически выбирающего метод в зависимости от характеристик решаемой задачи. Для образовательных систем подобный гибридный подход особенно перспективен, так как позволяет сочетать высокую производительность при обработке данных с полной интерпретируемостью принимаемых решений.

Ключевые слова: производственные системы, И-ИЛИ-дерево, тензорные представления, онтологии, образовательные системы.

An analysis of logical inference in production systems for big data processing tasks has been conducted. Despite the effectiveness of classical production systems, the combination of two approaches remains understudied: the use of AND-OR trees for intuitive logic representation and the application of tensor representations for performance enhancement. The research demonstrates the complementarity of these approaches, justifying the feasibility of creating an adaptive meta-algorithm that dynamically selects the method based on the characteristics of the problem being solved. For educational systems, such a hybrid approach is particularly promising, as it allows for combining high data processing performance with complete interpretability of the decisions made.

Key words: production systems, AND-OR-trees, tensor representations, ontologies, education system.

Введение

Предлагаемая работа направлена на развитие ряда положений предшествующих авторских работ [1-3], посвященных применению теоретико-множественных операций над порождающими грамматиками в продукционных системах автоматизированного проектирования программного обеспечения (САПР ПО). Спецификой данного подхода есть сужение порождающих грамматик до уровня И-ИЛИ-дерева, как инструмента, реализующего прецедентный подход в задачах принятия решений.

Ключевое отличие данной работы заключается в исследовании путей расширения математического аппарата теоретико-множественных операций над порождающими грамматиками, предложенных в указанных работах, новыми математическими сущностями, такими как тензора и полугруппы. В данной работе исследуется предлагаемый гибридный подход к организации логического вывода, рассматриваемого как комбинация тензорного подхода и И-ИЛИ-дерева. Обсуждаются специфика и достоинства такого подхода. Продукционные системы, основанные на правилах вида «если-то», формализуют причинно-следственные связи, что обуславливает их аналогию с формальными грамматиками, в частности, порождающими. Порождающая грамматика представляет собой классический формализм, задающий правила порождения строк или структур. В этом контексте продукционные системы могут рассматриваться как их обобщение, где правила применяются не только к строкам, но и к состояниям систем в различных предметных областях. Аспекты использования продукционных систем в рамках порождающих грамматик детально рассмотрены в [4-7].

Порождающая грамматика является не только теоретической конструкцией, но и практическим инструментом, обеспечивающим гибкость, автоматизацию и надежность при преобразовании пользовательских формул в исполняемые алгоритмы в системах сценарного моделирования [8]. Широкое применение продукционный подход находит в искусственном интеллекте, экспертных системах и автоматизации логического вывода. Рост сложности прикладных задач порождает потребность в интеграции продукционных систем с другими математическими методами, такими, как И-ИЛИ-дерева и тензорные вычисления. Подобный синтез потенциально позволяет повысить эффективность обработки многомерных данных и сложных логических структур [9], а также открывает возможность использования физической семантики для создания сложных интеллектуальных систем. Элементарная семантика уже является важным аспектом различных интеллектуальных систем [10], [11].

Практическая потребность в развитии рассматриваемых методов особенно очевидна в контексте современных образовательных и государственных информационных систем. Развитие технической инфраструктуры таких систем является критически важным фактором их эффективности. В этой связи в различных предметных областях предпринимаются попытки интеграции сложных математических и логических структур, включая онтологии и продукционные модели [10], [12-15]. Одновременно с этим, актуальной задачей становится применение онтологий при разработке информационных систем, в частности, в связи с внедрением концепции цифровой аналитической платформы для предоставления статистических данных, где ключевым требованием выступает использование онтологии данных, заложенной в модель государственных данных [16], [17]. Таким образом, возникает задача поиска эффективных методов для работы с комплексными онтологиями, объединенными с продукционными правилами.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа методов интеграции продукционного подхода с И-ИЛИ-деревьями и тензорными представлениями для оценки их формальных основ, применимости и ограничений при работе с комплексными онтологиями, объединенными с продукционными правилами.

Постановка задачи включает решение следующих ключевых аспектов:

- формализация математических моделей продукционных систем;
- формализация аппарата И-ИЛИ-деревьев для структурирования логического вывода;
- формализация тензорного представления для высокопроизводительных вычислений;
- проведение сравнительного анализа методов;
- исследование перспективных направлений развития.

Ключевым объединяющим аспектом рассматриваемых методов является их способность формализовать причинно-следственные связи. И-ИЛИ-деревья обеспечивают визуальную интерпретацию сложных условий через аналогию с формальными грамматиками, а тензорные представления реализуют те же правила в виде операций линейной алгебры, заимствуя принципы ковариантности из физических моделей. Исследование тензорного подхода в контексте продукционных систем направлено на создание структурного и математически строгого аппарата для работы со сложными онтологиями, выходящего за рамки классических методов.

Базовые принципы и математические модели продукционных систем

Продукционный подход формализуется в виде системы, основанной на правилах, рабочей памяти и механизме логического вывода. В контексте исследования методов интеграции с И-ИЛИ-деревьями и тензорными представлениями рассмотрим формальную структуру продукционных систем.

Продукционная система определяется тройкой [18]:

$$PS = \langle R, D, C \rangle, \quad (1)$$

где:

- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ — множество продукционных правил;
- D — рабочая память (база данных) - множество фактов или утверждений, например: $D = \{A, B, C, \dots\}$;
- $C: R \times D \rightarrow R$ — функция разрешения конфликтов, определяющая порядок активации правил. Основные стратегии включают приоритет по специфичности антецедента, приоритет по порядку добавления (FIFO) и приоритет по весу правил.

Каждое правило r_i имеет форму:

$$P \rightarrow Q \text{ (ЕСЛИ } P, \text{ ТО } Q), \quad (2)$$

где P — антецедент (условие), Q — консеквент (действие). Антецедент P может представлять собой булеву комбинацию условий:

$$P = A \wedge B \vee C. \quad (3)$$

В системах с неопределенностью добавляются веса или коэффициенты уверенности:

$$r_i: P \rightarrow Q \text{ (CF} = 0.8). \quad (4)$$

В логике предикатов правило может включать переменные:

$$\forall x (P(x) \rightarrow Q(x)), \quad (5)$$

например, $\forall x (\text{Студент}(x) \wedge \text{СдалЭкзамен}(x) \rightarrow \text{ДопущенКЗащите}(x))$, $x = \text{Иван}$.

Процесс вывода и его виды:

– сопоставление: для каждого правила r_i проверяется, выполняется ли его антецедент P в текущей рабочей памяти D . Формально: $D \models P$.

– активация: при истинности P , консеквент формируется в массив Q и добавляется в D или модифицирует его:

$$D_{\text{нов}} = D_{\text{стр}} \cup Q; \quad (6)$$

– цикл "Выбор-Действие": процесс повторяется, пока применимые правила не будут исчерпаны.

Процесс вывода демонстрируется на примере системы диагностики: при наличии в рабочей памяти фактов {ДвигательНеЗаводится, СветФарТусклый} активируется правило r_1 : ЕСЛИ ДвигательНеЗаводится \wedge СветФарТусклый, ТО РазряженАккумулятор, что приводит к модификации рабочей памяти и последующей активации правила r_2 . Больше примеров для понимания работы можно найти в трудах Shortliffe [19].

Продукционные системы допускают различные математические интерпретации:

– в теории автоматов: система представляется как конечный автомат $\langle S, \Sigma, \delta, s_0 \rangle$, где S — множество состояний (содержимое D), Σ — алфавит операций (правила R), δ — функция переходов (применение правил);

– в теории графов — правила и факты образуют ориентированный граф, где ребра — импликации $P \rightarrow Q$.

– в логике Хорна: каждое правила эквивалентно дизъюнктам Хорна [20]:

$$\neg P \vee Q. \quad (7)$$

К основным ограничениям относятся:

– возможность циклов при взаимозависимых правилах ($A \rightarrow B, B \rightarrow A$), решением которого является введение счетчиков активаций или мета-правил для прерывания циклов [21], [22];

– немонотонность вывода, так как добавление новых фактов может инвалидировать предыдущие выводы, решением которого является механизмы отката или нечеткая логика [22], [23].

Данная формализация обеспечивает строгий анализ продукционных систем, проектирование эффективных механизмов вывода и их интеграцию с современными методами ИИ, включая алгоритмы верификации на основе методов проверки моделей [23], [24].

Визуализация и структурирование логического вывода с помощью И-ИЛИ-деревьев

И-ИЛИ-деревья представляют формальный аппарат для структурированного представления пространства поиска решений в задачах искусственного интеллекта. В контексте интеграции с продукционными системами они обеспечивают наглядное представление сложных логических условий.

Формально И-ИЛИ-дерево определяется как ориентированный граф [21], [26]:

$$T = (V, E, \tau), \quad (8)$$

где:

– $V = V_{\text{И}} \cup V_{\text{ИЛИ}} \cup V_{\text{лист}}$ — множество вершин,

– $E \subseteq V \times V$ — множество дуг,

– $\tau : V \rightarrow \{ \text{И}, \text{ИЛИ}, \text{лист} \}$ — функция типа вершины.

Вариантом И-ИЛИ-дерева называется поддерево, полученное удалением всех дуг, кроме одной, для каждой ИЛИ-вершины. Мощностью дерева называется количество его вариантов [25].

И-ИЛИ-деревья находятся в соответствии с контекстно-свободными грамматиками, где И-узлы соответствуют конкатенации ($A \rightarrow BC$), а ИЛИ-узлы — альтернативным продукциям ($A \rightarrow B \mid C$). Это соответствие позволяет применять их для синтеза программ по техническим заданиям, автоматического порождения онтологий и верификации.

Интеграция И-ИЛИ-деревьев с продукционной системой $PS = \langle R, D, C \rangle$ осуществляется через представление антецедентов правил $r_i \in R$ в виде деревьев T_i . Логика вычисления истинности вершины v определяется рекурсивно [22]:

- если $\tau(v) = \text{И}$: значение истинно тогда и только тогда, когда истинны все потомки;
- если $\tau(v) = \text{ИЛИ}$: значение истинно тогда и только тогда, когда истинен хотя бы один потомок.

На примере правила $r: A \wedge (B \vee C) \rightarrow Q$ соответствующее И-ИЛИ-дерево представлено на рисунке 1 [22]. При активации нескольких правил выбор осуществляется стратегией конфликтного разрешения C , определенной в продукционной системе.

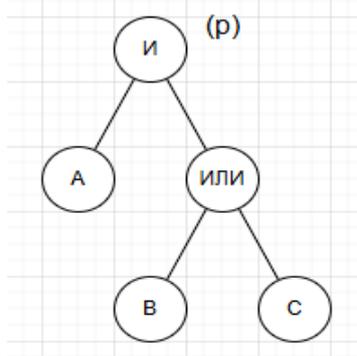


Рисунок 1 – Правило в виде дерева

Аналогичный подход к использованию формальных грамматик для преобразования графовых структур представлен в работе [27], где продукционные правила применяются для трансформации деревьев зависимостей. В исследованиях А. Григорьева [1-3] формальные грамматики используются для манипулирования И-ИЛИ-деревьями в онтологиях. К преимуществам интеграции И-ИЛИ-деревьев с продукционными системами относятся:

- структурированное представление сложных логических условий;
- эффективный инкрементальный вывод;
- естественная интеграция с логикой Хорна.

Основные ограничения метода [21]:

- экспоненциальный рост количества вариантов при ИЛИ-узлах;
- сложность верификации циклов;
- ограниченная выразительность.

Интеграция И-ИЛИ-деревьев с продукционным подходом обеспечивает высокую интерпретируемость логики принятия решений за счет структурного соответствия формальным грамматикам. Это позволяет применять методы синтаксического анализа (LL/LR), генерировать объяснения решений в виде выводимых цепочек и упрощать синтез правил через автоматизированное преобразование грамматик.

Тензорный формализм для высокопроизводительного логического вывода

Продукционная система допускает представление в виде ориентированного графа, где узлы соответствуют фактам, а дуги — правилам. Матрица смежности такого графа, имеющая размерность $m \times n$, представляет собой тензор ранга 2 и служит основой для перехода к тензорному исчислению.

Использование тензорного формализма позволяет унифицировать представление онтологий за счет объединения связанных величин и обеспечивает инвариантность уравнений относительно предметной области. Принципы физической ковариантности, используемые в тензорном формализме [28], обеспечивают инвариантность правил относительно перекодировки фактов, что согласуется с подходом к работе с физической семантикой [29].

Для формализации процесса логического вывода рабочая память D представляется как бинарный вектор $d \in \{0,1\}^n$ [21], [30], [31]:

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{если } f_j \in D \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

Однако простое умножение матрицы смежности на бинарный вектор не учитывает условия, требующие нескольких фактов одновременно. Для решения этой проблемы применяется трехмерное тензорное представление [32], где выделяются три оси:

- факты - $J = \{j_1, \dots, j_k\}$ индексируются в векторном пространстве;
- правила - $I = \{i_1, \dots, i_n\}$ индексируются в векторном пространстве;
- выводы - $K = \{k_1, \dots, k_n\}$ индексируются в векторном пространстве.

Соответствующий тензор из трех осей в соответствии с рисунком 2, определяется как:

$$T[i, j, k] = \begin{cases} 1, & \text{если } r_i : f_j \rightarrow f_k \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (10)$$

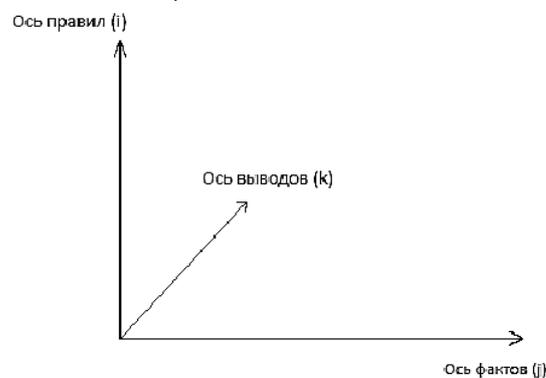


Рисунок 2 – Схема направление векторов тензора из примера

Процесс логического вывода формализуется через поиск применимых правил, что эквивалентно проверке условия $P_i \subseteq D$, что является классическим приемом в компьютерных науках [33-36]. Скалярное произведение векторов дает матрицу активаций $M \in \{0,1\}^{k \times n}$ [37]:

$$M[i, j] = d_j \cdot T[i, j, \ell] \quad (11)$$

Условие активации правила r_i определяется как:

$$\text{акв}(r_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^n M[i, j] = \|P_i\| \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (12)$$

где $\|P_i\|$ -количество фактов в антецеденте P_i .

Перспективным направлением развития является использование тензорной алгебры [38] для расширения возможностей предложенного подхода. К проблеме сложности визуализации тензорных представлений подошли авторы работы [39] и предлагают специализированные методы, такие как тензорные глифы.

Важной теоретической проблемой остается проверка достижимости вывода в тензорной парадигме. Как показано в [40], для продукционных систем, моделируемых матричными преобразованиями, проблема достижимости может оказаться алгоритмически неразрешимой уже для систем с матрицами 4×4 .

К преимуществам тензорного подхода относятся:

- вычислительная эффективность за счет сведения к операциям линейной алгебры;
- возможность параллельной обработки на GPU/TPU;
- единое представление сложных систем правил;
- поддержка вероятностного вывода через расширение моделью.

Основные ограничения метода:

- экспоненциальный рост требований к памяти;
- сложность интерпретации без дополнительных методов визуализации;
- необходимость аппроксимации при большом количестве правил.

Тензорное кодирование преобразует символьные правила в операции линейной алгебры, создавая математически строгую модель, эффективно реализуемую на современном аппаратном обеспечении. Данный подход обеспечивает масштабируемость за счет параллельных вычислений и методов тензорного разложения.

Выводы

В работе выполнен сравнительный анализ методов интеграции продукционных систем со структурами И-ИЛИ-деревьев и тензорными представлениями. Анализ проводился с позиций оценки формальных основ, применимости и ограничений указанных подходов применительно к задачам обработки онтологий и работы с большими данными в образовательных системах.

Классические продукционные системы, обладая высокой интерпретируемостью и относительной простотой реализации, демонстрируют недостаточную производительность при обработке крупномасштабных массивов данных. Интеграция с И-ИЛИ-деревьями способствует структурированию сложных логических условий и обеспечивает прозрачность механизма логического вывода, включая поддержку инкрементальных вычислений. Однако данный подход сопряжен с проблемами комбинаторного роста вариантов и повышенной сложности верификации при циклических зависимостях.

Альтернативный подход на основе тензорных представлений позволяет перейти от символьных правил к операциям линейной алгебры, что обеспечивает существенное повышение производительности вычислений за счет параллелизации и низкоуровневой оптимизации. Тензорные методы обеспечивают компактное представление онтологических структур и обладают высокой масштабируемостью, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и затрудняют интерпретацию результатов.

Сравнительный анализ выявил комплементарный характер исследуемых подходов: тензорные представления демонстрируют более высокую производительность, в то время, как И-ИЛИ-деревья обладают преимуществом в интерпретируемости и гибкости настройки.

В качестве перспективного направления выделяется разработка адаптивного мета-алгоритма, способного динамически выбирать между использованием древовидных структур, тензорных вычислений или их гибридной комбинации. Критериями выбора должны служить объем обрабатываемых данных, требования к интерпретируемости модели и доступные вычислительные ресурсы.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на исследовании алгебраических свойств последовательностей преобразований в продукционных системах в рамках теории полугрупп и создании методов автоматического преобразования между различными формами представления правил.

Таким образом, синтез продукционного подхода с анализируемыми математическими формализмами позволяет создавать системы, сочетающие интерпретируемость логического вывода с вычислительной эффективностью, что особенно актуально для образовательной сферы с ее требованием обслуживания значительных потоков пользователей при сохранении прозрачности принимаемых решений.

Список литературы

1. Григорьев, А. В. Алгоритм выполнения теоретико-множественных операций над грамматиками в среде специализированной оболочки для создания интеллектуальных САПР // Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем (МАП-2002). 2002. № 52. С. 83–93.
2. Григорьев, А. В. Упорядочивание обликов в семиотической модели САПР // Искусственный интеллект. 2005. № 4. С. 465–477.
3. Григорьев, А. В. Специфика выполнения теоретико-множественных операций над контекстно-свободными грамматиками в условиях различных форм дополнительных семантических правил в семиотической модели интеллектуальных САПР // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем» (МАП — 2006). 2006. Вып. 5 (116). С. 91–104.
4. Khan M. F. Syntactic Transformation in Large Language Models (LLMs): A Transformational Generative Grammar (TGG) Perspective // Dicon Journal of Languages. 2025. Vol. 1, Issue 1. P. 24–43. DOI: <https://doi.org/10.64169/djl.23>.
5. Portelance E., Jasbi M. On the compatibility of generative AI and generative linguistics // Nature Computational Science. 2025. Vol. 5, No. 9. DOI: 10.1038/s43588-025-00861-2.
6. Pullum G. K. Creation Myths of Generative Grammar and the Mathematics of Syntactic Structures // The Mathematics of Language: collection of works / ed. by C. Ebert, G. Jager, J. Michaelis. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. P. 238–254. (Lecture Notes in Computer Science; vol. 6149). DOI: 10.1007/978-3-642-14322-9_18. ISBN 978-3-642-14321-2.
7. Атакищев, А. О. Продукционные сети как модели генерации и анализа вариантов принимаемых управленческих решений / А. О. Атакищев, С. А. Макаренков, И. М. Круглов, Д. О. Соколов // Т-Comm. 2008. № 4. С. 23–24.
8. Савушкин С. А., Бородин В. А., Цыганов В. В. Информационно-логическая компонента сценарного моделирования // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2021. № 1. С. 70–76. DOI: 10.47501/ITNOU.2021.1.70-76.
9. Гурин, А. Г. Обзор методов представления онтологий с физической семантикой / А. Г. Гурин, А. В. Григорьев // Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (СИТОНИ-2023). Донецк, 2023. С. 87–92.
10. Анцыферов, С. С. Методология развития интеллектуальных систем / С. С. Анцыферов, А. С. Сигов, К. Н. Фазилова // Проблемы искусственного интеллекта. 2022. № 2 (25). С. 42–47.
11. Харламов, А. А. Перспективы развития семантических представлений, основывающиеся на тенденциях нейроинформатики // Проблемы искусственного интеллекта. 2020. № 3 (18). – С. 3–17.
12. Андриевская, Н. К. Обобщенная модифицированная модель представления текстовых информационных ресурсов // Информатика и кибернетика. 2020. № 4 (22). С. 21–30.
13. Николаев, А. А. Международный опыт и перспективы использования искусственного интеллекта в образовании / А. А. Николаев, М. Ю. Кузнецов, В. А. Николаев // Управление образованием: теория и практика. 2024. Т. 14, № 5-1. DOI 10.25726/e8567-8724-8003-k. – EDN ZNISEA.

14. Чудина, Е. Ю. Решение задачи оптимизации уровня учебной успеваемости и самоактуализации обучающихся на основании двухфакторной регрессии с применением метода идеальной точки // Проблемы искусственного интеллекта. 2023. № 1 (28). С. 60–68.
15. Андриевская, Н. К. Онтологический подход в системах обработки данных научных и научно-образовательных организаций // Проблемы искусственного интеллекта. 2020. № 1 (16). С. 23–36.
16. Гаркуша, Д. А. Функциональные особенности реализованных онтологических платформ // Проблемы искусственного интеллекта. 2023. № 4 (31). С. 4–11.
17. Дорохина Г.В. Формализованные онтологии и задачи построения компьютерной информационной технологии цифрового сбора, обработки и анализа данных. Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение: материалы Донецкого международного научного круглого стола. Донецк: ГУ ИПИИ, 2020. С. 229–234.
18. Waterman, D. A. Pattern-Directed Inference Systems / D. A. Waterman, F. Hayes-Roth. Academic Press, 1978. 680 p. ISBN 978-0-12-737550-0.
19. Shortliffe, E. H. Computer-Based Medical Consultations: MYCIN. Elsevier, 1976. 264 p. ISBN 978-0-444-00183-0.
20. Brachman, R. J. Knowledge Representation and Reasoning / R. J. Brachman, H. J. Levesque. Morgan Kaufmann, 2004. 381 p. ISBN 978-1558609327.
21. Russell, S. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S. Russell, P. Norvig. 4th ed. Pearson, 2020. 1136 p. ISBN 978-0134610993.
22. Люгер, Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люгер; пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 864 с.
23. Baier, C. Principles of Model Checking / C. Baier, J.-P. Katoen. MIT Press, 2008. 975 p. ISBN 978-0262026499.
24. Model checking [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Model_checking (дата обращения: 25.09.2024).
25. Метод генерации тестовых заданий на основе деревьев И/ИЛИ и его программная реализация [Электронный ресурс] // Habr. URL: <https://habr.com/ru/articles/198068/> (дата обращения: 25.09.2024).
26. Nilsson, N. J. Principles of Artificial Intelligence. Springer, 1982. 476 p. ISBN 978-3-540-11340-1.
27. Полетаев А.Ю., Парамонов И.В., Бойчук Е.И. Алгоритм построения дерева синтаксических единиц русскоязычного предложения по дереву синтаксических связей // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 6. С. 1323-1353. DOI: 10.15622/ia.22.6.3.
28. Румянцев, В. В. Моделирование физических объектов / В. В. Румянцев, С. А. Федоров, А. Е. Рыбалка // Проблемы искусственного интеллекта. 2023. № 1 (28). С. 50–59.
29. Андриевская, Н. К. Гибридная интеллектуальная мера оценки семантической близости / Н. К. Андриевская // Проблемы искусственного интеллекта. 2021. № 1 (20). С. 4–17.
30. Newell, A. Human Problem Solving. The state of the theory in 1970 / A. Newell, H. A. Simon // American Psychologist. 1971. Vol. 26, no. 2. P. 145–159.
31. Laird, J. E. SOAR: An Architecture for General Intelligence / J. E. Laird, A. Newell, P. S. Rosenbloom // Artificial Intelligence. 1987. Vol. 33, no. 1. P. 1–64.
32. Rocktäschel, T. End-to-End Differentiable Proving / T. Rocktäschel, S. Riedel // Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017). 2017. P. 3788–3800.
33. Salton, G. Introduction to Modern Information Retrieval / G. Salton, M. J. McGill. McGraw-Hill, 1983. 448 p. – ISBN 0070544840.
34. Strang, G. Linear Algebra and Its Applications. 4th ed. Thomson Learning, 2006. 487 p. ISBN 978-0030105678.
35. Maida, A. S. Intensional Concepts in Propositional Semantic Networks / A. S. Maida, S. C. Shapiro // Cognitive Science. – 1982. – Vol. 6, no. 4. – P. 291–330.
36. Agrawal, R. Fast algorithms for mining association rules in large databases / R. Agrawal, R. Srikant // Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB). 1994. P. 487–499.
37. Kolda, T.G. Tensor Decompositions and Applications / T.G. Kolda, B.W. Bader // SIAM Review. 2009. – Vol. 51, no. 3. P. 455–500.
38. Дзедобоев, Д. И. Тензорная алгебра / Д. И. Дзедобоев // Проблемы искусственного интеллекта. 2025. № 3 (38). С. 11–18.
39. Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Орлов Г. О. Концепция обработки, анализа и визуализации геофизических данных на основе элементов тензорного исчисления // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23. № 2 С. 572–604. DOI: 10.15622/ia.23.2.10.
40. Рыбалов А. Н. О генерической сложности проблемы вхождения для полугрупп целочисленных матриц // Прикладная дискретная математика. 2022. № 55. С. 95–101. DOI: 10.17223/20710410/55/7.

References

1. Grigoriev, A. V. (2002). An Algorithm for Performing Set-Theoretic Operations on Grammars in a Specialized Shell for Creating Intelligent CAD Systems. *Scientific Works of Donetsk State Technical University. Series: Problems of Modeling and Automation of Dynamic Systems Design (MAP-2002)* (52), 83–93.
2. Grigoriev, A. V. (2005). Ordering of Appearances in the Semiotic Model of CAD. *Artificial Intelligence*, (4), 465–477.
3. Grigoriev, A. V. (2006). Specifics of Performing Set-Theoretic Operations on Context-Free Grammars Under Different Forms of Additional Semantic Rules in the Semiotic Model of Intelligent CAD. *Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series "Problems of Modeling and Automation of Dynamic Systems Design" (MAP-2006)*, 5(116), 91–104.
4. Khan, M. F. (2025). Syntactic Transformation in Large Language Models (LLMs): A Transformational Generative Grammar (TGG) Perspective. *Dibon Journal of Languages*, 1(1), 24–43. <https://doi.org/10.64169/djl.23>
5. Portelance, E., & Jasbi, M. (2025). On the compatibility of generative AI and generative linguistics. *Nature Computational Science*, 5(9). <https://doi.org/10.1038/s43588-025-00861-2>
6. Pullum, G. K. (2010). Creation Myths of Generative Grammar and the Mathematics of Syntactic Structures. In C. Ebert, G. Jager, & J. Michaelis (Eds.), *The Mathematics of Language* (pp. 238–254). Springer. (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6149). https://doi.org/10.1007/978-3-642-14322-9_18
7. Atakishchev, A. O., Makarenkov, S. A., Kruglov, I. M., & Sokolov, D. O. (2008). Production Networks as Models for Generating and Analyzing Alternatives for Management Decisions. *T-Comm*, (4), 23–24.
8. Savushkin, S. A., Borodin, V. A., & Tsyganov, V. V. (2021). Information-Logical Component of Scenario Modeling. *Information Technologies in Science, Education and Management*, (1), 70–76. <https://doi.org/10.47501/ITNOU.2021.1.70-76>
9. Gurin, A. G., & Grigoriev, A. V. (2023). A Review of Methods for Representing Ontologies with Physical Semantics. In *Modern Information Technologies in Education and Scientific Research: Materials of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference (SITONI-2023)* (pp. 87–92). Donetsk.
10. Antsiferov, S. S., Sigov, A. S., & Fazilova, K. N. (2022). Methodology for the Development of Intelligent Systems. *Problems of Artificial Intelligence*, 2(25), 42–47.
11. Kharlamov, A. A. (2020). Prospects for the Development of Semantic Representations Based on Neuroinformatics Trends. *Problems of Artificial Intelligence*, 3(18), 3–17.
12. Andrievskaya, N. K. (2020). Generalized Modified Model for Representing Textual Information Resources. *Informatics and Cybernetics*, 4(22), 21–30.
13. Nikolaev, A. A., Kuznetsov, M. Y., & Nikolaev, V. A. (2024). International Experience and Prospects for the Use of Artificial Intelligence in Education. *Education Management: Theory and Practice*, 14(5-1). <https://doi.org/10.25726/e8567-8724-8003-k>
14. Chudina, E. Y. (2023). Solving the Problem of Optimizing the Level of Academic Achievement and Self-Actualization of Students Based on Two-Factor Regression Using the Ideal Point Method. *Problems of Artificial Intelligence*, 1(28), 60–68.
15. Andrievskaya, N. K. (2020). Ontological Approach in Data Processing Systems of Scientific and Scientific-Educational Organizations. *Problems of Artificial Intelligence*, 1(16), 23–36.
16. Garkusha, D. A. (2023). Functional Features of Implemented Ontological Platforms. *Problems of Artificial Intelligence*, 4(31), 4–11.
17. Dorokhina, G. V. (2020). Formalized Ontologies and the Tasks of Building a Computer Information Technology for Digital Collection, Processing and Data Analysis. In *Artificial Intelligence: Theoretical Aspects, Practical Application: Materials of the Donetsk International Scientific Round Table* (pp. 229–234). State Institution IPII.
18. Waterman, D. A., & Hayes-Roth, F. (Eds.). (1978). *Pattern-Directed Inference Systems*. Academic Press.
19. Shortliffe, E. H. (1976). *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*. Elsevier.
20. Brachman, R. J., & Levesque, H. J. (2004). *Knowledge Representation and Reasoning*. Morgan Kaufmann.
21. Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
22. Luger, G. F. (2003). *Artificial Intelligence: Strategies and Methods for Solving Complex Problems* (Trans. from English). Williams.
23. Baier, C., & Katoen, J.-P. (2008). *Principles of Model Checking*. MIT Press.
24. Model checking. (2024, September 25). In Wikipedia. Retrieved September 25, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Model_checking

25. A Method for Generating Test Tasks Based on AND/OR Trees and Its Software Implementation. (n.d.). Habr. Retrieved September 25, 2024, from <https://habr.com/ru/articles/198068/>
26. Nilsson, N. J. (1982). Principles of Artificial Intelligence. Springer.
27. Poletaev, A. Y., Paramonov, I. V., & Boichuk, E. I. (2023). An Algorithm for Constructing a Tree of Syntactic Units of a Russian-Language Sentence from a Dependency Tree. *Informatics and Automation*, 22(6), 1323–1353. <https://doi.org/10.15622/ia.22.6.3>
28. Romyantsev, V. V., Fedorov, S. A., & Rybalka, A. E. (2023). Modeling of Physical Objects. *Problems of Artificial Intelligence*, 1(28), 50–59.
29. Andrievskaya, N. K. (2021). A Hybrid Intelligent Measure for Assessing Semantic Similarity. *Problems of Artificial Intelligence*, 1(20), 4–17.
30. Newell, A., & Simon, H. A. (1971). Human Problem Solving. The state of the theory in 1970. *American Psychologist*, 26(2), 145–159.
31. Laird, J. E., Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1987). SOAR: An Architecture for General Intelligence. *Artificial Intelligence*, 33(1), 1–64.
32. Rocktäschel, T., & Riedel, S. (2017). End-to-End Differentiable Proving. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 3788–3800.
33. Salton, G., & McGill, M. J. (1983). Introduction to Modern Information Retrieval. McGraw-Hill.
34. Strang, G. (2006). Linear Algebra and Its Applications (4th ed.). Thomson Learning.
35. Maida, A. S., & Shapiro, S. C. (1982). Intensional Concepts in Propositional Semantic Networks. *Cognitive Science*, 6(4), 291–330.
36. Agrawal, R., & Srikant, R. (1994). Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases. *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB)*, 487–499.
37. Kolda, T. G., & Bader, B. W. (2009). Tensor Decompositions and Applications. *SIAM Review*, 51(3), 455–500.
38. Dzeboev, D. I. (2025). Tensorial Algebra. *Problems of Artificial Intelligence*, 3(38), 11–18.
39. Vorobeva, G. R., Vorobev, A. V., & Orlov, G. O. (2024). A Concept for Processing, Analysis and Visualization of Geophysical Data Based on Elements of Tensor Calculus. *Informatics and Automation*, 23(2), 572–604. <https://doi.org/10.15622/ia.23.2.10>
40. Rybalov, A. N. (2022). On the Generic Complexity of the Membership Problem for Semigroups of Integer Matrices. *Applied Discrete Mathematics*, (55), 95–101. <https://doi.org/10.17223/20710410/55/7>

RESUME

Gurin A.G., Grigoriev A.V.

Comparative analysis of methods for enhancing the efficiency of production systems for big data processing

A comparative analysis of two directions for modernizing production systems has been conducted: integration with AND-OR trees and the application of tensor representations in the context of educational systems. The study evaluates the formal foundations, applicability, and limitations of these approaches for processing ontologies and working with big data.

Integration with AND-OR trees provides structural representation of complex logical conditions and a high degree of model interpretability, supporting efficient incremental inference. However, this approach is susceptible to combinatorial explosion and challenges with cyclic dependencies. The tensor method demonstrates enhanced performance through parallelism and compact data representation, contributing to system scalability. Its disadvantages include high memory requirements and complexity in interpreting results.

The analysis confirms the complementary nature of the approaches: tensor representations are effective for processing large data volumes, while AND-OR trees excel in interpretability and flexibility.

A promising direction is the development of an adaptive meta-algorithm capable of dynamically selecting or combining approaches based on current context (data volume, explainability requirements, available resources). An additional research direction involves integrating fuzzy logic and probabilistic inference methods for processing large rule sets.

РЕЗЮМЕ

Гурин А.Г., Григорьев А.В.

Сравнительный анализ методов повышения эффективности продукционных систем для работы с большими данными

Проведен сравнительный анализ двух направлений модернизации продукционных систем: интеграции с И-ИЛИ-деревьями и применения тензорных представлений в контексте образовательных систем. Исследование оценивает формальные основы, применимость и ограничения данных подходов для задач обработки онтологий и работы с большими данными.

Интеграция с И-ИЛИ-деревьями обеспечивает структурное представление сложных логических условий и высокий уровень интерпретируемости модели, поддерживая эффективный инкрементальный вывод. Однако данный подход подвержен комбинаторному взрыву и сложностям при циклических зависимостях. Тензорный метод демонстрирует повышенную производительность за счет параллелизма и компактного представления данных, что способствует масштабируемости системы. К недостаткам относятся высокие требования к памяти и сложность интерпретации результатов.

Анализ подтверждает комплементарный характер подходов: тензорные представления эффективны для обработки больших объемов данных, тогда как И-ИЛИ-деревья превосходят в интерпретируемости и гибкости.

Перспективным направлением является разработка адаптивного мета-алгоритма, способного динамически выбирать или комбинировать подходы на основе текущего контекста (объема данных, требований к объяснимости, доступных ресурсов). Дополнительное направление исследований включает интеграцию методов нечеткой логики и вероятностного вывода для обработки крупных наборов правил.

Гурин А.Г. – соискатель, аспирант, ФГБОУ ВО ДонНТУ, кафедра «Программная инженерия им. Л.П. Фельдмана», 283001, Донецк, ул. Артема, 58, тел +7(949) 364 1724, gurin.sasha.1996@gmail.com.

Область научных интересов: моделирование интеллектуальных систем, онтологии, тензорные исчисления, полугруппы, нейронные сети.

Григорьев А.В. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО ДонНТУ, кафедра «Программная инженерия им. Л.П. Фельдмана», 283001, Донецк, ул. Артема, 58, тел +7(949) 334 9185, grigorievalvl@gmail.com.

Область научных интересов: интеллектуальные системы автоматизации проектирования, формальные грамматики, онтологии, нейронные сети.

Статья поступила в редакцию 09.09.2025.