

Эволюционная модель представления знаний

В.В. Холмогоров

Аннотация – Настоящая работа посвящена эволюционной модели представления знаний. Данная модель представляет собой самовоспроизводящуюся систему знаний, способную посредством операторов эволюционных вычислений генерировать новые знания на основе уже существующих моделей и пользовательских типов данных, определять выводимость знаний, а также выявлять наиболее полезную информацию на основе прецедентов и правил аффинитивного анализа.

Данная модель представления знаний создана с целью повысить степень самостоятельности интеллектуальных систем путём автоматизации процесса генерации знаний о предметной области решаемой задачи, правил их применения и реакции объектов среды на производимые системой действия, повысить вариативность предоставляемых системой решений, повысить степень информативности (путём замены классической древовидной структуры на эволюционную) и реализовать возможность создания новых моделей на основе главных компонентов родительских моделей.

Концепция данной модели и её реализация могут позволить создавать модели представления знаний, которые будут не только хранить и описывать знания и связи между ними, генерировать новые знания и производить самостоятельную оптимизацию, но и решать задачи каждой из составляющих модели по отдельности или в совокупности, то есть выполнять эволюционные вычисления для задач оптимизации, производить поиск и анализ схожих и взаимозависимых элементов в структурах данных, и обеспечивать представление знаний в компьютерных системах.

Ключевые слова – эволюционная модель представления знаний, модели представления знаний, эволюционные модели, эволюционные вычисления, аффинитивный анализ, интеллектуальные системы, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема представления знаний и попытка рассуждений на их основе интересовала специалистов из области математики, информатики и искусственного интеллекта ещё на заре последнего, так в число первых попыток реализации интеллектуальных систем, основанных на знаниях, входил реализованный ещё в 1957 и описанный в 1959 году Алленом Ньюэллом и Гербертом Саймоном «Решатель Общих Проблем» (General Problem Solver, GPS) [1] компьютерная система, способная анализировать цели, декомпозировать их на подцели с дальнейшей разработкой стратегий достижения подцелей, также стоит отметить алгоритмы поиска оптимального решения вроде методов поиска в пространстве состояний, позволяющих на основе разных методов обхода вершин графа состояний находить определённые ключевые состояния системы [2].

Однако конкретные частные разработки вроде вышеописанных не позволяли получить некоего общего концептуального подхода для моделирования знаний и размышлений на их основе, к тому же к началу 70-х XX века в психологии произошла когнитивная революция [3], в результате которой когнитивные модели (многоуровневые междисциплинарные модели, основой которых являются символизм и коннекционизм [3]) пришли на смену бихевиоризму (модели, основанные на рефлексах и стимуляции, которые в большей степени отталкиваются от поведения [4]), все эти события привели к продвижению когнитивных моделей в ИИ, в результате чего появились продукционные, фреймовые, объектные модели, а также семантические сети, которые впервые были использованы Ричардом Риченсом в 1956 для реализации машинного перевода естественных языков [5] и которые переродились к 2013 году в качестве основы технологии Web 3.0 [6] для отображения семантических связей между элементами сети интернет.

На сегодняшний день проблема представления знаний главным образом актуальна для задач всемирной паутины, для которых как раз и была разработана Web 3.0, целью которой является замещение поиска текста в строках путём токенизации (замещение реальных данных на зашифрованные или упрощённые аналоги) и построения логических связей между токенами, а также вывода новых данных и модернизации онтологий за счёт классификаторов, однако эта технология имеет достаточное количество проблем, которые консорциум World Wide Web Consortium объединяет в одну, называемую «неопределённостью» [7], включающую в себя главным образом обширность, неточность (наличие состояний, которые нельзя однозначно и адекватно формализовать), расплывчатость (наличие значений, которые с определённой вероятностью могут соответствовать нескольким состояниям), несогласованность (наличие логических противоречий), обман (наличие намеренно искажённой информации). Возможным способом решения подобной проблемы, как и проблем представления знаний в компьютерных системах в целом, могла бы послужить модель, которая самостоятельно производит поиск и генерацию связей между знаниями, формирует новые знания на основе уже существующих независимо от их представления, а также обладает достаточной степенью автономности и доказуемости полученных данных. Среди технологий искусственного интеллекта одной из самых производительных технологий на сегодняшний день являются методы эволюционных вычислений (далее ЭВ) [8], которые способны решать достаточно широкий спектр нетривиальных задач: оптимизация, анализ и

генерация данных, предиктивная аналитика, планирование, исследовательская работа, симуляция (в том числе естественной эволюции) и даже искусство [9]. Высокая вариативность предоставляемых решений, возможность решений многомодальных задач (задач с большим количеством параметров), а также подробная история достижимости результатов на основе генетических связей и исторических данных позволяют повысить вероятность достижимости целевых состояний и степень доказательности полученных решений в случае удовлетворения их требованиям фитнеса, а эволюционная стратегия обеспечивает большую устойчивость системы [10]. Таким образом, модель представления знаний (далее МПЗ), реализованная на основе методов и модели эволюционных вычислений, могла бы повысить производительность процесса формирования и поиска знаний, привести генерацию новых знаний, повысить их степень доказательности, достижимости и повысить степень их восприятия для человека, поэтому настоящая работа направлена на описание концепции эволюционной модели представления знаний (далее ЭМПЗ).

I. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РЕАЛИЗУЕМОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Для определения критериев решаемых задач и описания концепции модели настоящей работы необходимо учитывать следующие компоненты проблемы представления знаний, поднятые в 1985 году Ронам Брахманом [11]:

1. Примитивы, которые описывают базовую (элементарную) структуру представления знаний.
2. Метапредставление, как проблема отображения в информатике, которая относится к способности формализма иметь доступ к информации о своём собственном состоянии и быть изменяемой во время выполнения.
3. Неполнота, обусловленная недостаточным набором фактов и тем самым невыводимости некоторых формул из других.
4. Определения и универсалии, которые необходимо учитывать так же, как и факты по умолчанию с соответствующей областью их действия.
5. Немонотонную систему рассуждений, позволяющую опровергать и доказывать на основе опровержения, а также поддерживать зависимости между элементами в динамических системах.
6. Выразительная адекватность, обычно представляемая функциональной полнотой и описывающая возможности модели построения новых структур и их адекватности относительно фактов.
7. Эффективность рассуждений, описываемая количеством времени, затрачиваемого на выполнение самого алгоритма рассуждений и вывода на его основе, обычно является обратной стороной выразительной адекватности, так как чем она выше (а то есть больше количество инструментов описания структур), тем больше времени занимает процесс рассуждений.

Для реализации модели необходимо знать принцип работы и инструменты следующих МПЗ [12], [13]:

- продукционную модель, которая описывает представление знаний путём соединения объектов базы данных продукционными отношениями (отношение типа «если А, то В»), напрямую связывающие объекты ПрО без явной логики этой связи;
- логическую модель, которая описывает модель знаний при помощи логики высказываний и предикатов, в которой высказывания и предикаты являются элементами алфавита, логические операции – элементами синтаксиса, ППФ – аксиомами, а правила проверки построения утверждений – правилами вывода ;
- функциональную МПЗ, которая «основана на языке равенств и на операционном понимании равенств как правил редукций или правил переписывания термов» [14], то есть модель знаний в такой МПЗ представляет собой совокупность функций, которые можно вывести друг из друга, а сами правила вывода основаны на приведении сложных функций к более простому виду (что и является редукцией) и на правилах замены одних функциональных термов (параметров функций) на другие;
- семантическую сеть (далее СС), которая представляет собой помеченный ориентированный граф, вершины которого соответствуют объектам предметной области (далее ПрО), а дуги (рёбра) задают отношения между ними, то есть в каждой вершине графа находится некоторый объект ПрО, а дуги со стрелками и метками показывают, от какого объекта к какому идёт связь и что она собой представляет;
- фреймовую МПЗ, которая «представляет собой систематизированную психологическую модель памяти человека и его сознания» [12], в которой единицей знания является фрейм, содержащий в себе свой уникальный идентификатор, являющейся также его именем, и слоты, уникальные в рамках этого фрейма и хранящие в себе любые значения от переменных и указателей на функцию, до указателей на другие фреймы, указателей наследования и меток для функций-демонов, которые способны менять состояние фрейма без учёта модификаторов доступа его слотов, а также описания типов отношений между фреймами, что позволяет реализовывать сети фреймов по аналогии с СС;
- объектно-ориентированная МПЗ, которая представляет собой модель представления предметной области в виде классов, отражающих описание объектов реального мира с учётом их атрибутов и методов, объекты в модели – конкретные экземпляры классов, которые создаются по их описанию и тем сам реализуют конкретную ситуацию ПрО, при этом в основе концепции объектно-ориентированной модели лежат: инкапсуляция, подразумевающая описание класса в виде отдельной закрытой структуры с модификатором доступа, определяющим возможности доступа к классу извне (в том числе из других классов в структуре наследования), полиморфизм, описывающий применение одних и тех же структур класса для работы

с разными типами данных, а также наследование, определяющее возможность доступа дочернего класса к структуре высших в древе иерархии наследования.

Также необходимо знать следующие инструменты ЭВ, реализующие операции генерации данных в ЭМПЗ:

- эволюционные алгоритмы (далее ЭА): подмножество ЭВ, алгоритмы общей метаэвристической оптимизации на основе популяций, использующий механизмы, вдохновлённые биологической эволюцией, такие как размножение, мутация, рекомбинация и отбор [15];

- генетические алгоритмы (далее ГА): более конкретизированный и точный вариант ЭА, в основе которого лежат операторы мутации, скрещивания и селекции, которые порождают область решения, а фитнес-функция даёт ей оценку;

- эволюционное программирование: одна из парадигм эволюционных алгоритмов, в которой структура системы остаётся константной, а изменению подвержены именно числовые значения, обычно в таких системах все изменения происходят за счёт операторов мутации;

- генетическое программирование: метод эволюции программ, основанный на ГА, позволяющий улучшить результаты и структуру первоначальной программы;

- эволюционную стратегию: описывает саму стратегию эволюционных вычислений схожую в ЭА, но с нормальным распределением векторов действительных чисел в мутации, а также самоадаптацией его параметров.

Поиск ассоциативных связей (далее АС) между объектами предметной области в модели производится на основе следующих правил аффинитивного анализа (далее АА) [16]:

- правило поддержки, позволяющее определить, как часто встречается объект или совокупность объектов в модели;

- правило доверия, позволяющее определить отношение частоты совместной встречи объектов к частоте первого объекта;

- правила лифта и рычага, позволяющие определить силу связи объектов в редких и более частых наборах (а также в больших и малых);

- правило уверенности, которое позволяет оценить цену ошибку в случае, если обнаруженные вышеописанные правила оказались ошибочными и объекты на самом деле не связаны.

II. КОНЦЕПЦИЯ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Эволюционная модель представления знаний должна учитывать компоненты проблемы представления знаний, описанные в данной работе, следовательно компоненты самой ЭМПЗ должны удовлетворять компонентам проблемы, для чего были выделены следующие способы:

1. Примитивами ЭМПЗ могут быть любые машиночитаемые структуры данных (то есть те структуры, которые можно представить в виде символьных последовательностей вроде чисел, строк,

бинарных файлов и файлов с разметкой), примитивы других МПЗ и сами МПЗ, что позволит модели или пользователю самостоятельно определять элементарные структура исходя из области решаемой задачи и данных, с которыми работает модель в конкретной задаче.

2. Метапредставление ЭМПЗ (как и других МПЗ) поддерживается экземплярами описываемых в программе структур, а также связей между ними, при этом переопределение атрибутов возможно в момент выполнения программы.

3. Проблема полноты МПЗ главным образом обуславливается необходимостью определения дополнительных аксиом для учёта эвристик реального мира, а также степенью уверенности в истинности определённого утверждения, что в ЭМПЗ решается (как и в других МПЗ) заданием начальной системы утверждений (структур и связей между ними) и правилами аффинитивного анализа, которые определяют в модели силу связи между элементами, которая может интерпретироваться как степень уверенности.

4. Универсалии в МПЗ обычно определяются как множества и их подмножества, а определения как элементы этих множеств, в ЭМПЗ каждый примитив является множеством (которое может также содержать и подмножества в виде таких же примитивов), а элементы этих примитивов могут являться и элементами, и другими множествами.

5. Немонотонная система рассуждений, которая представляет собой гипотезы и их доказательства или опровержения, в ЭМПЗ представляет собой возможность генерации новых структур при помощи операторов эволюционных вычислений и достижения при помощи них структур, изначально несоединённых друг с другом.

6. Выразительная адекватность ЭМПЗ описывается следующим методами:

- древовидная иерархическая структура, описываемая направленным графом с помеченными вершинами, имеющим не вертикальное, а круговое представление подобное филогенетическому дереву жизни (Рисунок 1), вершинами которого являются определённые структуры данных, метками – уникальные значения структур, весами – сила и свойства связей между структурами и атрибутами структур;

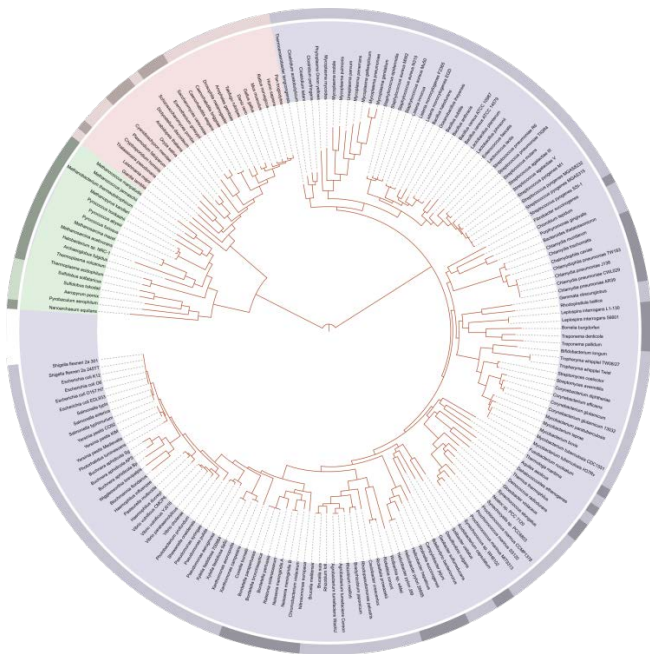


Рисунок 1 – Филогенетическое дерево жизни

- эволюционные и генетические алгоритмы, которые позволяют представить каждую вершину графа как особь, а её атрибуты – как гены, над которыми производятся операции скрещивания, мутации и селекции на основе фитнес-функции, генерируя новые вершины;

- правила аффинитивного анализа, позволяющие определить то, как часто определённая вершина или её атрибут встречаются в модели, с какими вершинами или другими атрибутами они связаны, насколько они зависимы друг от друга и какова вероятность ошибки суждений, если зависимость мнимая.

7. Эффективность рассуждений ЭМПЗ обусловлена возможностью как вывода на основе сетевых моделей, имеющих иерархические связи, вроде IsA (is a), AKO (a kind of), PO (part of), HP (has part) и других семантических связей, так и механизмов, основанных на правилах аффинитивного анализа, которые позволяют оптимизировать текущую или создать новую модель на основе наиболее связанных друг с другом вершин и их элементов.

Концепцию построения и работы эволюционной модели представления знаний можно описать следующей последовательностью действий:

1. Подготовка шаблона структуры данных для модели: данными для модели могут являться известные факты предметной области (например, совокупность аксиом формальной системы, данные и их продукции, определённый текст утверждений, числовые значения и функции, связывающие их), набор данных, полученный в результате процесса поиска данных (Data Mining) или некоторый текст с соблюдёнными правилами его оформления и разметки, также необходимо определить шаблон связей между объектами, которые могут выступать в виде отдельных атрибутов внутри вершины, представляющих собой отдельные структуры, как и сами объекты, что позволяет создать многообразие объектов и их связей.

2. Загрузка данных в приложение, реализующее модель, с последующим построением изначальной модели знаний по определённому в пункте 1 шаблону с выделением вершин и связей между ними.

3. Определение критериев оптимизации модели, критериями могут быть: целевая функция (например, функция приспособляемости на основе косвенных признаков или метрик качества на основе некоторых известных целевых или промежуточных значений и состояний), а также критерий загруженности модели, определяющий, что произведённая в процессе вычислений модель является избыточной, труднодостижимой и малопродуктивной.

4. Определение эволюционной стратегии на основе методов эволюционных и генетических алгоритмов для применения к вершинам этих методов для вывода новых вершин с разными атрибутами и их значениями.

5. Выполнение операций эволюционных вычислений над объектами предметной области, находящимися в вершинах модели, с получением на их основе новых объектов (вершин модели) и последующим отбором наиболее приспособленных из них.

6. Установка связей между родительскими объектами и дочерними объектами, прошедшими отбор, с метками рёбер «child» у направленной связи от родительской вершины к дочерней и меткой «parent» от дочерней вершины к родительской.

7. Поиск общих признаков у всех родительских и дочерних объектов, прошедших отбор, и в случае нахождения в их составе общих для некоторых из них атрибутов, между этими объектами устанавливаются связи, метками рёбер которых становится метка этого признака (атрибута), которая также устанавливается между всеми дочерними и родительским объектами, где этот атрибут проявляется, вверх по иерархии.

8. Повторение выполнения пунктов 5-7 до достижения моделью критерия загруженности, по достижении этого критерия при недостаточной силы связи объект, не имеющей ни одной сильной связи или недостаточного их количества (в зависимости от определённых в пункте 3 критериев), удаляется из модели.

9. Добавление новых знаний из внешней среды возможно в течение всего времени существования модели, начиная с выполнения пункта 3, при этом в модели могут существовать как и изолированные вершины, так и отдельные участки, никак не соединённые друг с другом, при достижении моделью уже существующей вершины или попытки добавления её извне новая вершина не добавляется, а вместо этого родительские или другие объекты, которые связаны с аналогичной вершиной на основании новой информации, связываются с ней по новому описанию, полученному от результатов пунктов 5 и 6, или полученному из внешней среды.

III. ПРИКЛАДНОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ И ЕЁ ВОЗМОЖНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Эволюционная модель представления знаний главным образом является моделью представления

знаний в компьютерных системах, поэтому основными задачами её программной реализации являются хранение данных в приложении и обеспечение связей между ними для реализации базы и модели знаний. Однако, так как она совмещает в себе инструменты эволюционных вычислений и инструменты аффинитивного анализа, приложение может выполнять задачи, традиционно ими решаемые.

Как инструмент МПЗ концепции ЭМПЗ имеет следующие преимущества:

- возможность хранить знания в динамических и нефиксированных структурах, определяемых самим специалистом или сторонним приложением;
- возможность определять силу зависимости знаний друг от друга на основе правил АА, важность и актуальность знаний в зависимости от прецедентов их появления и количества связей в модели;
- самостоятельная оптимизация модели на основе вышеописанных правил и критериев оптимизации и загруженности модели;
- возможность самостоятельной генерации новых знания без сторонних инструментов с помощью ЭВ для обеспечения вывода дополнительных возможностей, зависимостей и знаний в модели.

При решении задач на основе эволюционных вычислений ЭМПЗ имеет следующие преимущества как инструмент ЭВ:

- возможность применения эволюционных и генетических алгоритмов для выполнения задач оптимизация, поиска, аппроксимации и симуляции;
- базу исторических данных модели, а также путей достижения каждого из решений, что позволяет использовать модель как систему контроля версий в процессе вычислений для возвращения к лучшим вершинам из тупиковых состояний и при редукции результатов;
- различные методы эволюционных вычислений, позволяющие изменять ход вычислений в процессе, избегая остановки или долгого нахождения алгоритма в точках локальных экстремумов.

При решении задач на основе поиска ассоциативных правил ЭМПЗ имеет следующие преимущества как инструмент АА:

- возможность поиска и построения ассоциативных правил в модели, лишённой избыточных данных, выбросов и артефактов за счёт отсутствия однообразных структур и структур, не приводящих в ожидаемым в соответствии с критериями результатам;
- возможность подтверждения актуальности, полезности или ошибочности получаемых данных на основе критериев оптимизации и загруженности модели;
- обоснованность зависимости объектов ПрО не только от связей на основе ассоциативных правил, но и семантических связей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая значимость, разработанной концепции заключается в том, что эволюционная модель представления знаний предоставляет возможности

свободно определять модель представления знаний, не ограничиваясь уже существующими моделями, генерировать более сложные онтологии знаний с помощью эволюционных вычислений и оптимизировать модель знаний, основываясь на ассоциативных связях между объектами предметной области и их атрибутами.

Практическая значимость концепции ЭМПЗ заключается в том, что она позволяет создавать пользовательские шаблоны структур знаний и связей в модели представления знаний, генерировать новые знания при помощи алгоритмов ЭВ для получения структур, наиболее актуальных для задачи конкретной предметной области, определять ассоциативные связи между объектами для определения основных компонентов модели предметной области.

Перспективы развития концепции и её реализации заключаются в возможности решения как задачи моделирования знаний конкретной предметной области, так и оптимизации самой модели и задачи в этой области, что может позволить решать проблемы поиска актуальной и достоверной информации в различных локальных информационных источниках и открытом интернете, прогнозировать и симулировать развитие, обучение и неформальный вывод в эвристических системах знаний.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Niels J. Nielsson (October 30, 2009). In Search of Artificial Intelligence. Cambridge University Press. pp. 121-. ISBN 978-1-139-64282-8.
- [2] David Poole and Alan Mackworth. 3.2 State Spaces. Artificial Intelligence — foundations of computational agents.
- [3] Miller, George A. (March 1, 2003). "The cognitive revolution: a historical perspective". *Trends in the Cognitive Sciences*. 7 (3): 141-144. doi : 10.1016/S1364-6613(03)00029-9. ISSN 1364-6613.
- [4] Araiba, Shaw (June 2019). "The Current Diversification of Behaviorism". *Perspectives on Behavioral Science*. 43 (1): 157-175. doi: 10.1007/s40614-019-00207-0. PBC 7198672. PMID 32440649.
- [5] Lehmann, Fritz; Rodin, Erwin J., eds. (1992). *Semantic networks in artificial intelligence*. International series in contemporary applied mathematics and computer science. Vol. 24. Oxford; New York: Pergamon Press. p. ISBN 978-0080420127. OCLC 26391254.
- [6] The Semantic Web in the W3C: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>.
- [7] «An Uncertainty Rationale for the World Wide Web». <https://W3.org>.
- [8] Анисимов В.В., Ещенко Р.А. Интеллектуальные информационные системы. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2017. – 86с.
- [9] J. P. Collomosse und P. M. Hall: Genetic Paint: A Search for Salient Paintings, 2005.
- [10] Genetic Algorithms, URL: <https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/>.
- [11] Brachman, Ron (1985). "Introduction". In Ronald Brachman and Hector J. Levesque (ed.). *Readings in*

Knowledge Representation. Morgan Kaufmann. pp. XVI–XVII. ISBN 978-0-934613-01-9

- [12] Бочкова Е.Г., Васильев С.С. «Модели представления знаний». Уфимский государственный авиационный технический университет. NovaInfo 58, с.12-20.
- [13] Головчинер М.Н. Интеллектуальные информационные системы. Томский государственный университет, Факультет прикладной математики и кибернетики.
- [14] Системы искусственного интеллекта 2.6. Модели представления знаний: сайт. – URL: <https://studfile.net/preview/986642/page:19/> (дата обращения 16.05.2023).
- [15] Vikhar, P. A. (2016). "Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects". Proceedings of the 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICCC). Jalgaon: 261–265.
- [16] Larose, Daniel T.; Larose, Chantal D. (2014-06-23). Discovering Knowledge in Data. doi:10.1002/9781118874059. ISBN 9781118874059.

Статья получена 16.06.2023 г.

В.В. Холмогоров, МИРЭА (e-mail: Hv13@mail.ru).

Evolutionary model of knowledge representation

V.V. Kholmogorov

Abstract - This article focuses on an evolutionary model of knowledge representation. This model is a self-reproducing knowledge system, capable of generating new knowledge based on existing models and user-defined data types through evolutionary computation operators, determining knowledge inference, and identifying the most useful information based on precedents and affinitive analysis rules.

This model of knowledge representation was created to increase the degree of independence of intellectual systems by automating the process of knowledge generation about the domain of the problem being solved, rules of their application and reaction of environmental objects to actions made by the system, to increase the variability of solutions provided by the system, to increase the information content (by changing the classical tree-like structure into an evolutionary one) and to implement the possibility of creating new models on the basis of the parent models' main components.

The concept of this model and its implementation may allow creating models of knowledge representation, which will not only store and describe knowledge and connections between them, generate new knowledge and perform independent optimization, but also solve the tasks of each of the model components separately or in aggregate, i.e. perform evolutionary calculations for optimization tasks, search and analyze similar and interdependent elements in data structures, and provide knowledge representation in computer systems.

Key words - evolutionary model of knowledge representation, knowledge representation models, evolutionary models, evolutionary computing, affinity analysis, intelligent systems, artificial intelligence.

REFERENCES

- [1] Niels J. Nielsson (October 30, 2009). In Search of Artificial Intelligence. Cambridge University Press. pp. 121-. ISBN 978-1-139-64282-8.
- [2] David Poole and Alan Mackworth. 3.2 State Spaces. Artificial Intelligence — foundations of computational agents.
- [3] Miller, George A. (March 1, 2003). "The cognitive revolution: a historical perspective . Trends in the Cognitive Sciences. 7 (3): 141-144. doi : 10.1016/S1364-6613(03)00029-9. ISSN 1364-6613.
- [4] Araiba, Shaw (June 2019). "The Current Diversification of Behaviorism. Perspectives on Behavioral Science. 43 (1): 157-175. doi: 10.1007/s40614-019-00207-0. PBC 7198672. PMID 32440649.
- [5] Lehmann, Fritz; Rodin, Erwin J., eds. (1992). Semantic networks in artificial intelligence. International series in contemporary applied mathematics and computer science. Vol. 24. Oxford; New York: Pergamon Press. p. ISBN 978-0080420127. OCLC 26391254.
- [6] The Semantic Web in the W3C: <https://www.w3.org/standards/semanticweb/>.
- [7] «An Uncertainty Rationale for the World Wide Web». <https://W3.org>.
- [8] Anisimov V.V., Eshenko R.A. Intelligent information systems. Khabarovsk: FEFUPS Publishing House, 2017. - 86c.
- [9] J. P. Collomosse und P. M. Hall: Genetic Paint: A Search for Salient Paintings, 2005.
- [10] Genetic Algorithms, URL: <https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/>.
- [11] Brachman, Ron (1985). "Introduction." In Ronald Brachman and Hector J. Levesque (ed.). Readings in Knowledge Representation. Morgan Kaufmann. pp. XVI-XVII. ISBN 978-0-934613-01-9
- [12] Bochkova E.G., Vasiliev S.S. "Models of knowledge representation". Ufa State Aviation Technical University. NovaInfo 58, pp.12-20.
- [13] Golovchiner M.N. Intelligent information systems. Tomsk State University, Faculty of Applied Mathematics and Cybernetics.
- [14] Artificial intelligence systems 2.6. Models of knowledge representation: site. - URL: <https://studfile.net/preview/986642/page:19/> (accessed 16.05.2023).
- [15] Vikhar, P. A. (2016). "Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects". Proceedings of the 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). Jalgaon: 261-265.
- [16] Larose, Daniel T.; Larose, Chantal D. (2014-06-23). Discovering Knowledge in Data. doi:10.1002/9781118874059. ISBN 9781118874059.