

УДК 681.513

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ МЕТАНАВЧАННЯ ТА МЕТАМОДЕЛЮВАННЯ

Є.А. Савченко, В.С. Степашко

*Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій
та систем НАН та МОН України*

savchenko@irtc.org.ua, stepashko@irtc.org.ua

Виконано порівняльний аналіз термінів та задач метанавчання та метамоделювання. Наводяться приклади таких задач, методів і засобів їх розв'язання. Характеризується зв'язок понять онтологія та метамодель.

Ключові слова: метамодель, метанавчання, метамоделювання, машинне навчання, індуктивне моделювання, онтологія

A comparative analysis of terms and tasks of metalearning and metamodeling is carried out. Examples of such tasks, methods and tools for its solution are given. A relation of the ontology and metamodel terms is characterized.

Keywords: metamodel, metalearning, metamodelling, machine learning, inductive modelling, ontology

Выполнен сравнительный анализ терминов и задач метаобучения и метамоделирования. Приводятся примеры таких задач, методов и средств их решения. Характеризуется связь понятий онтология и метамодель.

Ключевые слова: метамодель, метаобучение, метамоделирование, машинное обучение, индуктивное моделирование, онтология

Вступ

Приставка «мета» означає надбудову над деяким об'єктом, так, наприклад, метадані є даними про дані, тобто це деяка додаткова узагальнена інформація про дані.

Під метаданими розуміють інформацію про дані або інформацію про інформацію. Метазнання (в штучному інтелекті) – це частина бази знань, що описує її структуру. Метамодель в інформатиці — це модель, яка описує іншу модель, транзитивне відношення між двома моделями.

Принцип, який застосовується при розв'язанні задачі метамоделювання – це фундаментальний, давно відомий принцип, що використовується в філософії, математиці, природознавстві, зараз він просто отримав нове ім'я. Термін метамоделювання розглядають як спосіб узагальнення рішень і можливостей.

Цей термін активно використовується в англomовних текстах, але має багато різних значень. Нижче будуть розглянуті деякі з них.

Іншою задачею з приставкою «мета» є задача метанавчання. Основний принцип метанавчання – це навчання навчатися. Його використовують при машинному навчанні в галузі інформатики.

В роботі поставлено завдання проаналізувати задачі метамоделювання та метанавчання і з'ясувати питання, яке виникає при їх вивченні: чи відрізняються ці дві задачі, і якщо відрізняються, то чим.

1. Поняття та концепція метанавчання

Метанавчання є галуззю машинного навчання [1], в якій застосовуються алгоритми автоматичного навчання на метаданих про комп'ютерні експерименти. На сьогодні цей термін не знайшов стандартної інтерпретації, однак основною метою його застосування є зрозуміти, як автоматичне навчання може допомагати у розв'язанні проблем навчання, отже, покращити ефективність існуючих алгоритмів навчання або навчити комп'ютер автоматично викликати сам алгоритм навчання.

Використовуючи різноманітні метадані, такі як властивості задачі навчання, властивості алгоритму (наприклад, показники ефективності), можна навчитися вибирати, змінювати або поєднувати різні алгоритми навчання для ефективного розв'язання задачі навчання.

В [2] *метанавчання* визначається як стара неформальна концепція когнітивної психології, яка зовсім нещодавно стала формальною концепцією машинного навчання. На практиці, метанавчання може використовуватись для автоматизації людських рішень (наприклад, налаштування параметрів), автоматичного перегляду та оптимізації отриманих рішень на основі нового досвіду, отриманого в ході навчання [3].

В [4] визначено, що *метанавчання* - це вивчення принципів методів, які використовують метазнання для отримання ефективних моделей та рішень шляхом адаптації процесів машинного навчання та обробки даних. Незважаючи на те, що в даний час різноманітні методи машинного навчання та обробки даних можуть бути доступними і вони можуть забезпечити хороші модельні рішення, але потрібна розробка методології ефективного пошуку найбільш відповідної моделі.

Метанавчання забезпечує таку методологію, яка дозволяє системам ставати більш ефективними завдяки накопиченому досвіду. У [4] розглядаються декілька підходів до отримання знань про ефективність машинного навчання та алгоритмів пошуку даних. Ці знання можуть бути використані повторно для вибору, комбінування, складання та адаптації алгоритмів та моделей для швидшого, більш ефективного розв'язання проблем видобуванням даних. Таким чином, це може допомогти розробникам удосконалювати свої алгоритми та розвивати системи навчання.

В [5] метанавчання визначено як навчання ряду моделей на великій сукупності наборів даних з метою конструювання моделі, яка дозволить відповісти на наступні питання:

- в яких випадках дерево рішень, скоріш за все, буде кращим, ніж метод опорних векторів?
- коли від лінійного класифікатора можна очікувати поганої якості?
- чи можна використовувати дані для рекомендації конкретних параметрів?

Концепція *метанавчання* відноситься до сфери аналізу даних для прогнозування, що поєднує прогнози різних моделей. Частіше вона застосовується, якщо моделі, охоплені проектом, належать до різних типів [6].

Наприклад, припустимо, що наш проект аналізу даних містить три класифікатори, лінійний дискримінантний аналіз та нейронні мережі. Кожний з них визначає класифікацію, з якої можна обчислити загальний критерій узгодження (наприклад, частка помилок класифікації). Досвід показує, що поєднання прогнозів декількох методів дає більш точний результат, ніж отриманий з будь-якого окремого методу [7].

Прогнози різних класифікаторів можуть бути використані як вхідні дані процедур метанавчання, що дозволить об'єднати прогнози для створення найкращої класифікації. Так, наприклад, прогнози класифікації трьох класифікаторів, лінійної моделі та нейронних мереж можуть бути використані як вхідні змінні в метакласифікаторі нейронних мереж, який намагається знайти з даних правильне співвідношення прогнозів різних моделей для досягнення максимальної точності класифікації.

Можна багатократно застосувати процес метанавчання, використовуючи на кожному кроці як вхідні дані результату попереднього кроку; однак на практиці таке експоненційне збільшення обсягу обробки даних з метою точного прогнозування, з кожним кроком дає менше і менше користі [6].

Якщо припустити, що вибір кращого алгоритму якимось формалізовано і виконується він автоматично, то далі завдання полягає в тому, щоб настроїти параметри цього алгоритму, щоб отримати найкращий результат, тобто вибір алгоритму і його управляючих параметрів – це завдання метанавчання.

2. Поняття метамоделювання

Термін «метамоделювання» виник в інформатиці як надбудова над моделюванням. П'ятнадцять років тому вузький круг людей, що працюють у зовсім різних галузях, таких як будівництво, хімічна промисловість, програмування, управління та автоматизація бізнесу, усвідомили, що займаються схожим видом діяльності – створенням точного формального опису деякої предметної галузі [8].

Тому виникла потреба узагальнити проблеми, що виникають в цих галузях на всіх етапах: збору даних, їх обробки, керування об'єктами з метою автоматизації для спрощення діяльності та наведення порядку, щоб сформувати

загальну структуру, яка все ж таки мала б певний рівень гнучкості і розширюваності.

Основною метою *метамодельовання* [9] є описати дані настільки глибоко, щоб вони були самодостатніми і допускали розширення і модифікацію своєї структури. Аналогічною властивістю хотілося б наділити і програмне забезпечення, що працює з цими даними. При метамодельованні це відбувається автоматично. Засоби, засновані на метамодельованні, гнучкі, оскільки вони написані не для конкретного випадку даних, з конкретною структурою і з фіксованими залежностями, а працюють в загальному випадку. Інформація про структуру даних зчитується з моделі й метамоделі, і автоматично налаштовується на них.

Ключове питання метамодельовання [5]: як спроектувати ознаки, на основі яких будується метамодель? Ці ознаки повинні поєднувати в собі характеристики набору даних і релевантних аспектів моделі навчання. Характеристики набору даних не повинні обмежуватися простим переліченням кількості і вигляду ознак і кількістю об'єктів, тому мало ймовірно, що на основі тільки лиш цієї інформації можна буде передбачити щось змістовне про якість моделі.

Автор [5] робить висновок, що спроба метанавчання на всіх можливих проблемах марна, інакше можна було б побудувати одну гібридну модель, яка використовує метамодель, щоб визначити, у якій базовій моделі якість буде перевершувати випадкову на конкретному наборі даних. А це значить, що ми можемо лише сподіватися, що метанавчання виявиться корисним при розв'язанні проблем навчання з нерівномірним розподілом.

Вважається, що метамодельовання дозволить нам в загальному вигляді розв'язувати виникаючі проблеми і легко розширювати систему. Також є цілком обґрунтована надія, що моделювання дозволить:

- зробити дані більш семантично насиченими,
- явно формально описати) приховану семантику структури даних.

Сьогодні метамодельовання стало важливим кроком при розв'язанні завдань інтеграції бізнесу та даних, створення довгоживучих, складних, розширюваних систем.

Дві важливі властивості на яких базується метамодельовання:

- замкненість, тобто працюючи з обраною формальною моделлю ми не вийдемо за її межі.
- повнота обраної формальної системи означає, що в її рамках можна описати всі об'єкти з даної множини.

Системи, засновані на принципах мета моделювання, повинні мати властивості розширюваності (адаптивності) та універсальності (спільності).

Розглянемо деякі реальні приклади метамodelей.

Якщо у нас є сукупність об'єктів, можна побудувати модель кожного з них (об'єкти одного класу, близькі за функціями, але виконують різні операції), але краще побудувати метамодель цієї групи об'єктів.

Така метамоделювання є узагальненою моделлю цього класу або групи об'єктів і коли ми якимись параметрами цю загальну модель модифікуємо, вона буде описувати будь-який конкретний об'єкт цієї групи.

Якщо є клас чи група об'єктів, то непотрібно будувати моделі кожного, а достатньо побудувати одну узагальнену модель, яка при тих чи інших значеннях своїх параметрів описує достатньо точно будь-який з об'єктів у цій групі або класі. Тоді це і буде метамоделювання, яка у своїй структурі фактично містить частинні моделі кожного конкретного об'єкта такого класу.

Наприклад, в [10] описано фактично метамоделювання ітераційного алгоритму індуктивного моделювання – один програмний продукт, який у своїй структурі містить сім програм з різними властивостями, тобто цей продукт є метамоделлю ітераційного алгоритму МГУА. Метамоделлю є також узагальнений критерій МГУА, який містить у собі всі інші критерії [11].

Авторами [12] розроблено та реалізовано власний ітераційний алгоритм, який може в різних модифікаціях давати різні варіанти алгоритмів, які можуть працювати по-різному і давати різні моделі, тобто метою метанавчання є вибір кращого алгоритму для конкретної задачі.

3. Порівняння задач метанавчання та метамоделювання

Чи близькі між собою метанавчання та метамоделювання? Загалом очевидно, що це різні речі, але взаємодоповнювані.

Метамоделювання – це побудова узагальнених моделей певної групи об'єктів (програмних засобів, математичних моделей, інформаційних систем). Така метамоделювання покриває якийсь клас об'єктів (інформаційних, фізичних або математичних) і в частинних випадках описує різні класи об'єктів.

Якщо говорити про програмні метамоделі, то, наприклад, узагальнений ітераційний алгоритм МГУА [10] дозволяє будувати математичні моделі конкретних об'єктів. Для того, щоб використати цю програмну метамоделювання, їй треба задати параметри, і ми зможемо отримати конкретну модель. Процес навчання такої метамоделі охоплює визначення параметрів роботи цієї метамоделі. Якщо керуючі параметри задані (довжина вибірки свобода вибору, кількість аргументів, клас моделей, метод оцінювання параметрів і т.ін.), тоді ми просто використовуємо конкретний алгоритм для конкретного об'єкта.

Якщо побудувати такий засіб, який дозволить автоматично настроювати цю метапрограму як метамоделювання ітераційних алгоритмів з визначенням алгоритму, найбільш адекватного конкретному об'єкту, настроїти його керуючі параметри, тоді це вже буде процес навчання. Якщо цей процес навчання використовує попередні результати вдалої чи невдалої роботи цієї метапрограми, тоді цей процес буде називатися метанавчанням.

Тобто метанавчання моделі – це використання конкретного алгоритму з наперед заданими параметрами для отримання моделі. Коли ми отримуємо конкретну модель, ми оцінюємо структуру і параметри. Вибір структури і параметрів моделі і є навчанням. Якщо ми вибираємо з якогось комплексу

алгоритм, найкращі чи найбільш адекватні значення керуючих параметрів – це вже є метанавчання, тобто навчання на результатах первинного навчання.

В [13] для вибору найбільш доцільних методів попередньої обробки даних для конкретної задачі проводиться серія експериментів з різними комбінаціями методів типу заповнення пропусків, виявлення і видалення викидів та інших методів препроцесингу. Автор змінює послідовність методів обробки та керуючі параметри кожного методу і розв'язує серію задач від початку до кінця. Потім, маючи результати експериментів, будує узагальнену їх апроксимацію і визначає, яка з цих послідовностей методів попередньої обробки даних є доцільною. Це також можна назвати *метанавчанням*.

Просто навчання – це запуск окремого алгоритму і отримання моделі. *Метанавчання* – коли ми з групи алгоритмів автоматично обираємо кращий і налаштуємо його керуючі параметри. Такий найкращий алгоритм з оптимальними значеннями керуючих параметрів дозволяє отримати структуру і параметри оптимальної моделі для даного об'єкта.

Таким чином, задачі метамодельювання та метамодельювання зовсім різні, але взаємодоповнювані. Якщо у нас є метамодель, то ми можемо застосувати метанавчання для того, щоб найкращим чином використати цю метамодель (наприклад, метапрограму).

Комплекс, розроблений у [14], можна також назвати метапрограмою. Він в собі містить багато варіантів алгоритмів, тобто є узагальненням багатьох алгоритмів.

Таким чином, фактично кожен з фахівців, хто займається моделюванням, працює з метанавчанням вручну, комбінує різні можливості, щоб отримати найкращий результат. Якщо розробити методи та засоби автоматичного налаштування цих алгоритмів для знаходження найкращого рішення, це і буде реалізацією принципів метанавчання на практиці.

Таким чином, метамодельювання є узагальненням деякої інформації про групу об'єктів в конкретній моделі, а метанавчання – використанням накопиченого досвіду про найкращий шлях визначення структури і параметрів такої моделі. Можна сказати, що метамодельювання – узагальнення структури метаданих, а метанавчання – досвіду використання метамоделей.

4. Методи та засоби розв'язання задач метанавчання та метамодельювання

У [12] проведено систематизацію відомих систем метанавчання на основі розроблених класифікаційних ознак, що враховують внутрішню організацію систем. Сформульовано вимоги до реалізації автоматичної системи метанавчання. Запропоновано спосіб побудови системи метанавчання, що задовольняє всім сформульованим вимогам і виробляє накопичення метазнань, побудова на їх основі метамоделей, вибір оптимального алгоритму з набору доступних і обчислення оптимальних параметрів його функціонування. Розроблено об'єктно-орієнтовану архітектуру програмної платформи для

реалізації будь-якої з систем метанавчання, представлених в систематизації. Ефективність реалізованої автоматичної системи метанавчання з використанням алгоритмів МГУА перевірена експериментально при розв'язанні ряду задач прогнозування часових рядів.

В [15] розглядається застосування принципів метанавчання до оптимізації структури нейронної мережі. Показано, що застосування різноманіття даних, ансамблювання, самоорганізації та індуктивного підходу корисні для оптимізації її структури. Автори поєднують кілька різних типів нейронів, які навчаються різними методами для створення керованої нейронної мережі зі зворотнім зв'язком, яка називається Group of Adaptive Models Evolution (GAME).

Ще одне з застосувань терміну метамоделювання – програмна інженерія, яка використовується для формалізації знань про певну предметну галузь.

В [16] на конкретному прикладі описується ідея метамоделювання в контексті представлення знань. Моделі створюються на основі метамоделей. Метамоделювання розглядається на прикладі архітектури стандарту CDIF (CASE Data Interchange Format). Цей стандарт був створений в кінці XX століття і призначений для стандартизації передачі даних моделювання між CASE-засобами різних виробників.

Метамоделі розглядаються як засіб побудови моделей (наприклад, формальної мови або графічної нотації для опису структури класів, властивостей і зв'язків). Метамоделі - це моделі мови моделювання, яка застосовується для формалізації опису системи. *Лінгвістична метамоделі* - це метамоделі, яка описує предметно-незалежну мову моделювання. *Онтологічна метамоделі* - це метамоделі, яка описує предметно-залежну мову моделювання.

Засоби засновані на використанні багаторівневих моделей і метаданих [17] представляють різні сторони функціонування систем на різних рівнях абстракції і з різних точок зору. Основні рівні метаданих, що описують систему: логічний (опис об'єктів системи в термінах предметної області), фізичний (опис представлення даних в базі даних) і презентаційний (опис інтерфейсу користувача системи). Моделі і набір метаданих можуть змінюватися в процесі функціонування системи. Представлено підхід, що реалізується в CASE-технології METAS, призначеної для підтримки всього життєвого циклу адаптування систем. Функціонування системи будується на інтерпретації побудованих моделей. Можливості адаптації засновані на засобах реструктуризації даних, генерації і настройки призначеного для користувача інтерфейсу, управління документами, підключення нових програмних компонентів. Технологія METAS базується на використанні мови UML і предметно-орієнтованих мов для розробки моделей системи, опису бізнес-правил, специфічних для конкретних предметних областей.

В [18] концептуальні моделі інформаційних систем створюються відповідно до стандартів схем XML і RDF. Технологія XML використовується

для формалізації структури та відносин в інформаційних системах, RDF - для виділення та формалізації семантичних одиниць в конкретних предметних галузях використання даних інформаційних систем. Побудовані таким чином концептуальні моделі інформаційних систем можуть використовуватися для створення загальної метамоделі, що об'єднує в собі уявлення сутностей двох і більше сховищ даних.

В [19] описується метамодельовання як засіб візуального моделювання та програмування, а саме реалізація підтримки метапрограмування в системі QReal. Наводиться опис архітектури системи, процесу створення нової візуальної мови метазасобами системи, в тому числі візуального метаредактора і механізмів інтеграції метаредактора в середовище.

5. Зв'язок понять метамоделі та онтології

Метамодель – це модель, яка описує структуру, характеристики та принципи дії інших моделей [20]. Будь-яка програмна модель може бути описана (визначена) за допомогою відповідної унікальною метамоделі.

Поняття метамоделі зазвичай використовується в галузі інженерії:

- як схеми для семантичних даних ;
- як мова, яка підтримує конкретний метод або процес;
- як мова для вираження додаткової семантики існуючої інформації.

Метамодельовання. Метамодельованням називають процеси аналізу [20], конструювання та розробки фреймів, продукційних правил, обмежень, моделей і теорій, які можна застосувати для моделювання інтелектуальних і програмних інформаційних систем.

Зв'язок метамоделей з онтологіями. Поняття «метамодель» тісно пов'язане з поняттям «онтологія». Метамодельовання можна розглядати як явний опис (у вигляді конструкцій і правил) або модель конкретної предметної галузі. Зазвичай, метамоделі завжди слідуєть набору строгих правил. «Правильна» метамодель і є онтологією, але не всі онтології явно представляються метамоделями.

В [21] зазначено, що важливі класи моделей, до яких відносять і онтології, відображають структуру наявних знань про предметну галузь. Автори розглядають можливість побудови моделей предметної галузі за допомогою математичних засобів, що відображають структуру предметної галузі як частини дійсності. Цей підхід заснований на структуруванні властивостей предметної галузі за допомогою певної метамоделі, побудованої на підставі того чи іншого математичного апарату (алгебри, геометрії, теорії графів тощо).

В [22] метамодель онтологічних специфікацій визначає мову побудови онтології предметної галузі, коли експерт предметної галузі автоформалізує своє розуміння або фіксує його за допомогою інженера по знанням.

В [23] зазначається, що метамоделі тісно пов'язані з онтологіями. Обидві часто використовуються, щоб описати і проаналізувати відношення між поняттями:

- онтології корисні, щоб обмежити складність та структурувати інформацію. Онтологія розділяє змінні, необхідні для деякого набору обчислень, і встановлює відношення між ними;
- метамоделювання може бути розглянуто як явний опис (конструкції і правила) того, як побудована проблемно-орієнтована модель. Як правило, метамоделі – це строгий набір правил. Реальна метамоделі – це онтологія, але не всі онтології змодельовані явно як метамоделі.

Висновки

Розглянуто терміни та поняття метанавчання та метамоделювання. Порівняно задачі метанавчання та метамоделювання та визначено їх відмінності. Розглянуто приклади метамоделей. Наведено приклади застосування методів та засобів метамоделювання та метанавчання.

Планується розробка концепції та засобів на основі індуктивного підходу, що дозволить перенести принципи, відпрацьовані в галузі індуктивного моделювання, для розв'язання задач метамоделювання та метанавчання. Це дозволить автоматизувати процес ефективної побудови моделі.

Література

1. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Meta_learning_\(computer_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Meta_learning_(computer_science)) (дата звернення 16.11.2017).
2. Осіпчук Д.Є. Побудова рекомендаційної системи з використанням мета-навчання на основі OPENML. XV всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. Матеріали конференції «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (25 – 27 травня 2017 р., м. Київ, Україна).
3. Schaul T., Schmidhuber J. Metalearning. Scholarpedia. 2010. Vol. 5, no. 6. P. 46–50.
4. Metalearning: Applications to Data Mining / Pavel Brazdil, Christophe Giraud-Carrier, Carlos Soares, Ricardo Vilalta. 1st edition. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. P. 11–31. doi:10.1007/978-3-540-73263-1.
5. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М: ДМК-Пресс. 2015. 400 с.
6. Мета-обучение, URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/GlossaryTwo/M/Meta-Learning.htm> (дата звернення 16.11.2017).
7. Witten I., Frank E. Data Mining. Elsevier. 2005. 560 p.
8. Метамоделирование, URL: <https://ru.wikibooks.org/wiki/Метамоделирование> (дата звернення 16.11.2017).
9. Metamodeling, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metamodeling> (дата звернення 16.11.2017).

10. Stepashko V., Bulgakova O., Zosimov V. Construction and Research of the Generalized Iterative GMDH Algorithm with Active Neurons/ In: Advances in Intelligent Systems and Computing II / N. Shakhovska, V. Stepashko, Editors. AISC book series, Volume 689. Berlin: Springer, 2017. P. 474-491.
11. Степашко В.С. Метод критических дисперсий как аналитический аппарат теории индуктивного моделирования. Проблемы управления и информатики. 2008. № 2. С. 8-26.
12. Орлов А.В. Модели, алгоритмы и программная платформа для реализации мета-обучения на основе метода группового учета аргументов. Автореф. дис. Специальность 05.13.18 Томск, 2014. 24 с.
13. Čeppek M., Pavlíček M., Kordík P., Šnorek M. Automatic Method for Data Preprocessing for the GAME Inductive Modelling Method. Proceedings of the II International Conference on Inductive Modelling ICIM-2008, 15-19 September 2008, Kyiv, Ukraine. Kyiv: IRTC ITS NANU, 2008. P. 207-211.
14. Yefimenko S., and Stepashko V. Technologies of Numerical Investigation and Applying of Data-Based Modeling Methods. Proceedings of the II International Conference on Inductive Modelling ICIM-2008, 15-19 September 2008, Kyiv, Ukraine. Kyiv: IRTC ITS NANU, 2008. P. 236-240.
15. Pavel Kordík. Why Meta-learning is Crucial for Further Advances of Artificial Intelligence? – <https://chatbotslife.com/why-meta-learning-is-crucial-for-further-advances-of-artificial-intelligence-c2df55959adf>.
16. Краткое введение в метамоделирование на примере CDIF, URL: http://becmology.ru/blog/applied/meta_model.htm (дата звернення 15.11.2017).
17. Лядова Л. Метамоделирование и многоуровневые метаданные как основа технологии создания адаптируемых информационных систем. International Book Series "Information Science and Computing". С. 125-132.
18. Вагин В.Н., Михайлов И.С. Разработка метода интеграции информационных систем на основе метамоделирования и онтологии предметной области. Программные продукты и системы. 2008. С 22-26.
19. Кузенкова А.С., Литвинов Ю.В., Брыксин Т.А. Метамоделирование: современный подход к созданию средств визуального проектирования. Материалы второй научно-технической конференции молодых специалистов «Старт в будущее», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос. СПб. : ОАО "КБСМ 2011. С. 228–231.
20. Метамоделирование, URL: <https://studopedia.info/1-75610.html> (дата звернення 19.12.2017).
21. Межуев В.И. Особенности компьютерного моделирования предметных областей и систем, URL: <https://mejuev@ukr.net> (дата звернення 13.12.2017).
22. Смирнов С.В. Онтологическое моделирование в ситуационном управлении. Онтология проектирования, 2012, №2, С. 16-24.
23. Метамоделирование. <http://ru.knowledgr.com/00951418/Мета-моделирование> (дата звернення 17.12.2017).