

ОНТОЛОГІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.

Ч. 1. ФОРМУВАННЯ ОСНОВНИХ КОНЦЕПТІВ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

О. С. Омельченко, аспірант

Н. М. Луцька, доктор технічних наук, доцент

Національний університет харчових технологій

Л. О. Власенко, кандидат технічних наук, доцент

Державний торговельно-економічний університет

E-mail: alexmir_98@ukr.net, lutskanm2017@gmail.com, vlasenko.lidia1@gmail.com

Анотація. Наведено обґрунтування необхідності побудови онтології математичних моделей технологічних об'єктів промислових підприємств. Для цього було проведено опитування та отримані експертні оцінки, які показали, що наразі не існує повної класифікації існуючих математичних моделей та відповідних онтологій в області промисловості. Також експерти зазначили, що наявність подібної онтології суттєво полегшило їх роботу при проведенні досліджень і робіт, що пов'язані зі створенням високоефективних систем управління виробництвом на основі моделей. До таких моделей увійдуть існуючі математичні представлення технологічних процесів, а також методи ідентифікації їх параметрів. Базуючись на результатах експертних оцінок, побудовано діаграму Ісікави, яка відображає фактори, що впливають на розробку математичної моделі і є основою для розробки онтології. Також для створення адекватної онтології визначено місце математичної моделі в ієрархії існуючих моделей. Важливим етапом при проведенні проектування онтології стала сформована класифікація існуючих математичних моделей за виділеними характеристиками, до яких віднесли структуру моделі, її характер, її об'єктні властивості, призначення моделі та математичні залежності. Визначено основні концепти моделей, до яких увійшли класичні та сучасні різновиди моделей технологічних процесів.

Ключові слова: математична модель, онтологія, концепт, технологічний процес, зв'язок, автоматизація

Актуальність. Головною задачею автоматизації технологічних процесів та комплексів є підвищення ефективності виробництва. Це досягається за рахунок низки задач у структурі RAMI [1], однією з найперспективнішою з яких є оптимізація різних функцій підприємства. Для промислового підприємства, в тому

числі харчового, оптимізація технологічних та виробничих процесів підвищує ресурсоефективність виробництва, що є визначальною складовою прибутку. Такі оптимізаційні системи безпосередньо взаємодіють з автоматичною системою керування нижнього рівня та, як правило, використовують математичні моделі різного походження [2, 3]. Адекватна модель дозволяє з мінімальними затратами застосовувати моніторинг, прогнозування, оптимізацію та управління поведінкою технологічного процесу, виробничої операції або виробництва в цілому.

Вибір математичної моделі передбачає, перш за все, аналіз характеристик об'єкта автоматизованого управління, результатом якого є визначення типів математичних моделей, які здатні ефективно відтворювати цей об'єкт. Головними втратами при цьому є час, що затрачається на цей аналіз. Тип та структура моделі обирається суб'єктивно та залежить від вподобань розробника та його професійної кваліфікації. Виходячи з системного аналізу під час такого вибору, в першу чергу, постає питання щодо класифікації математичних моделей та критеріїв їх вибору для конкретних ситуацій. Одним із варіантів вирішення цих проблем є розробка та представлення різнотипних математичних моделей у вигляді онтологічної бази знань. Такий підхід має декілька переваг порівняно зі звичайною класифікацією:

- *semantic reasoner*, або семантичний механізм формування міркувань дозволяє виявляти нові залежності, використовуючи вказані базові знання та аксіоми;
- гнучкість в редагуванні та розширенні онтології, оскільки структура онтології динамічно змінюється в залежності від наявних правил;
- можливість формування параметризованих запитів до бази знань, відповідь на які формуються з урахуванням результатів роботи *semantic reasoner*;
- можливість задавання аксіом, що пов'язують класи онтології, їх відношення, екземпляри, а також відношення з іншою предметною областю.

Таким чином, онтологія математичних моделей є складовою системи підтримки прийняття рішень щодо вибору моделі для вирішення типових задач, що виникають при розробці автоматичної чи автоматизованої системи управління технологічними процесами, комплексами та виробничими операціями промислового підприємства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш повно сучасні методи синтезу математичних моделей технологічних, електротехнічних та інших об'єктів наведені в [4]. Тут на високому рівні викладено результати синтезу низки моделей з різних областей знань на основі регресійних моделей та моделей, які побудовані на матеріальних та теплових балансах, а також дані практичні рекомендації стосовно вибору їх структури та розрахунку параметрів. Однак в них відсутній системний та методологічний підхід вибору типу моделі.

Проблема вибору математичної моделі та застосування необхідного математичного апарату постає в багатьох промислових задачах, у першу чергу за необхідності побудови математичного оператора, що відображає реальний технологічний об'єкт. Для прогнозування та управління його роботою необхідно підібрати модель, яка б максимально наближено повторювала його поведінку та дала змогу на її основі синтезувати керуючий пристрій [5, 6]. Аналогічна ситуація щодо високих вимог ідентифікації виникає при виборі цифрового двійника системи для досягнення синхронізації моделі та установки і реалізації інтегрованої системи моніторингу процесів у режимі реального часу [7–9]. Отже, постає задача розробки системи підтримки прийняття рішень, яка дозволить зменшити ступінь невизначеності при виборі моделі, відсіяти ті структури та підходи до її синтезу, що не здатні забезпечити оптимальний рівень прогнозування та зосередити увагу на ефективних рішеннях. Крім того, такий підхід відповідає сучасним міжнародним стандартам [10].

Нині існують прикладні розробки, що використовують онтологічний інжиніринг [11], однак вони стосуються окремих задач виробництва. Наприклад, в [12] розроблена онтологія предметної області синтезу робастних систем керування, а в [13] – онтологія предметної області щодо моніторингу та діагностики стану обладнання. Вказані предметні області використовують математичні моделі, однак вони різняться за типом, структурою, способом представлення тощо. Тобто, виникає задача онтологічного опису саме математичних моделей, що використовуються в промисловості.

Мета дослідження – розробка концепції онтологічного класифікатора існуючих математичних моделей, який можна інтерпретувати як онтологію ядра (Core ontology) та є основою онтології предметної області (Domain ontology), які разом (Core ontology + Domain ontology) використовуватимуться в системах підтримки прийняття управлінських рішень щодо вибору математичного апарату відносно цілей розробки при автоматизованому управлінні харчовим підприємством.

Матеріали та методи дослідження. Вибір типу математичної моделі є складною задачею, що залежить від подальшого використання цієї моделі, особливостей об'єкта, вимог до системи, обмежень, які накладаються навколишнім середовищем та особливостями функціонування об'єкту, вимогам до ступенів точності та адекватності, форми та структури представлення математичної моделі в залежності від вирішуваної задачі.

В групі серед 43 експертів було проведено опитування, на якому було поставлені дві групи питань. Перша група стосувалась проблем, з якими зіштовхувались експерти, при побудові математичних моделей в своїй роботі. Друге коло проблем було пов'язано з тим, які фактори були найбільш значущі при побудові математичних моделей в своїх дослідженнях. Експертами виступали науковці, які працюють у сфері автоматизації та інформаційних технологій, зокрема, доктори та кандидати технічних наук, аспіранти, які наразі працюють над своїми дисертаційними роботами на здобуття наукового ступеня PhD та спеціалісти, які займаються проектуванням інтелектуальних автоматизованих систем, включаючи роботи по проектуванню промислових цифрових двійників. Кожен з експертів має досвід побудови математичних моделей технологічних процесів.

Обробка думок експертів проводилась методом ранжування [14]. Кожен експерт проводив оцінювання запропонованих факторів за десятибальною шкалою, де 10 – найвище значення, а 1 – найменш значуща оцінка. Сформована група експертів показала високий результат щодо узгодженості думок. Коефіцієнт конкордації $W=0,849$ [15].

У табл. 1 наведено перелік факторів (найзначущі зі списку), які оцінювали експерти, що були проблемою під час складання математичної моделі.

1. Основні проблеми побудови математичної моделі

Фактор	Пояснення
X1	Відсутність готових математичних моделей, які можна було б застосовувати без удосконалення
X2	Недостатність різного роду інформації та даних про технологічний об'єкт
X3	Складність вибору потрібного виду та типу математичної моделі для задачі, яка вирішується
X4	Відсутність чіткої класифікації існуючих математичних моделей
X5	Відсутність єдиної бази даних, яка б містила повні описи існуючих математичних моделей
X6	Необхідність оброблення великої кількості спеціальної технічної літератури для побудови математичної моделі

На рис. 1 наведено ранжування факторів, наведених в табл. 1, на основі результатів обробки експертних оцінок. Експерти зазначили, що до основних проблем відносяться: відсутність готових математичних моделей; недостатність даних для побудови адекватних і точних математичних моделей; відсутність єдиної бази даних, де можна підібрати потрібну математичну модель за її описом і характеристиками.

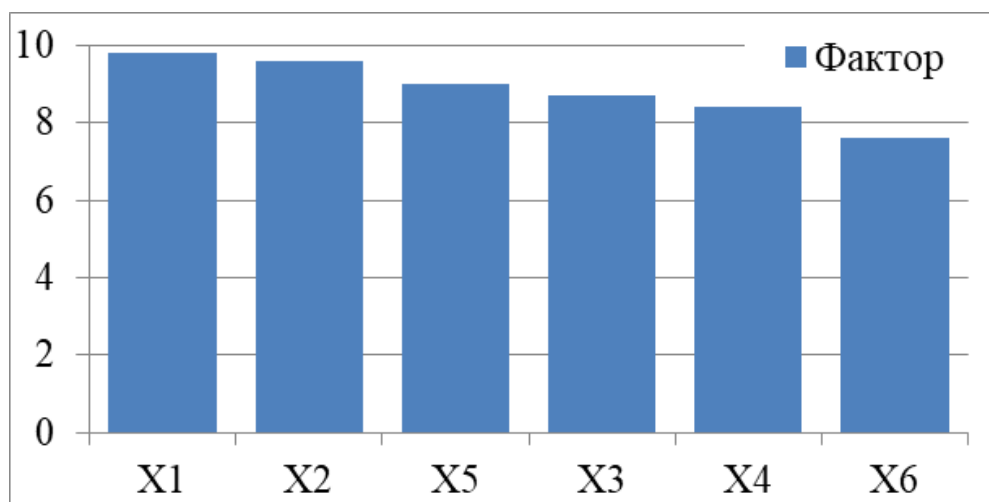


Рис. 1. Ранжування факторів першої групи питань

У табл. 2 наведено найзначущі з переліку наданих експертам фактори, які оцінювали, з якими вони стикались при побудові математичних моделей.

2. Основні фактори побудови математичної моделі

Фактор	Пояснення
Y1	Вид технологічного об'єкту, для якого розроблюється математична модель
Y2	Задача, для якої розробляється математична модель
Y3	Вимоги до математичної моделі
Y4	Призначення математичної моделі
Y5	Форма представлення математичної моделі в залежності від задачі
Y6	Структура математичної моделі
Y7	Врахування обмежень, які накладаються на математичну модель
Y8	Забезпечення заданої точності математичної моделі
Y9	Відповідність математичної моделі заданим оцінкам адекватності

На рис. 2 наведено ранжування факторів, наведених в табл. 2, на основі результатів обробки експертних оцінок. Згідно думки експертів на процес створення математичної моделі в першу чергу впливають задача, яку необхідно вирішити, обмеження, які необхідно ввести при проектуванні моделі та її точність, яку необхідно отримати.

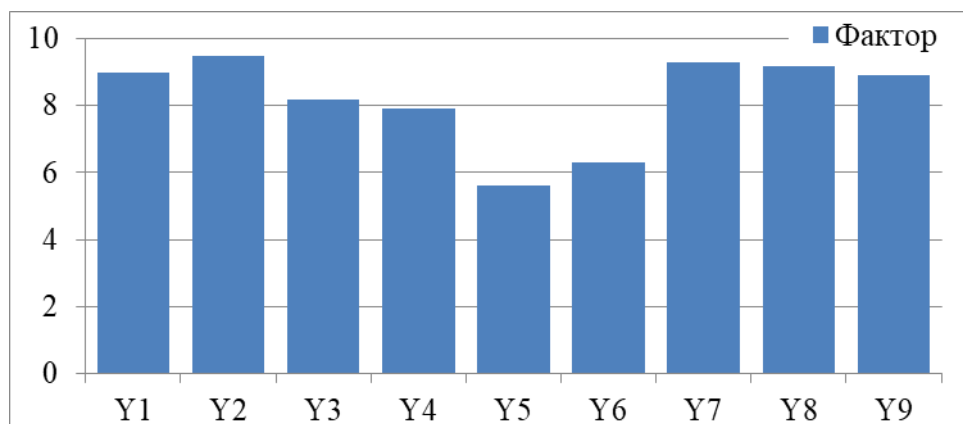


Рис. 2. Ранжування факторів другої групи питань

Для створення математичної моделі необхідно враховувати велику кількість факторів, які впливають на її кінцеву якість, на якість досліджень та якість роботи інтелектуальних автоматизованих систем. На рис. 3 наведено причинно-наслідкову

діаграму Ісікави розробки математичної моделі, яка побудована на основі результатів проведених експертних оцінок (табл. 2, рис. 2).

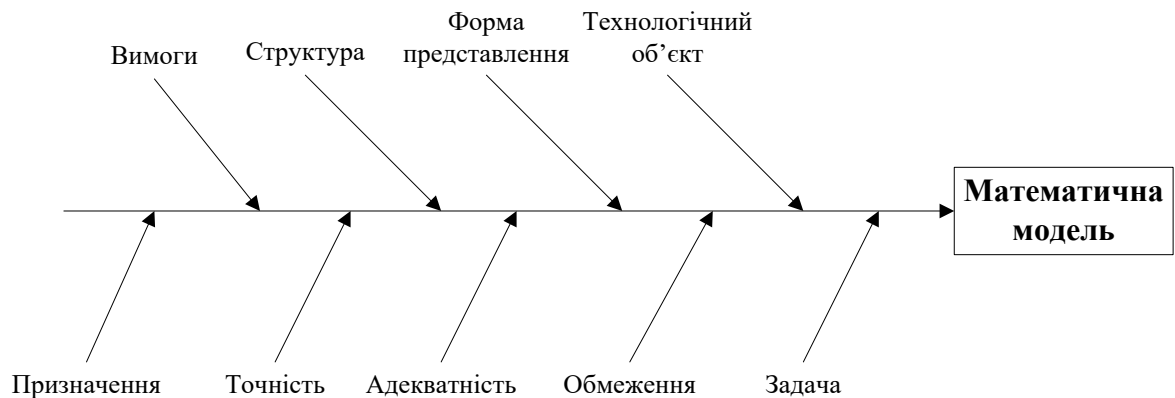


Рис. 3. Причинно-наслідкова діаграма побудови математичної моделі

Клас математичних моделей для задач харчової промисловості в загальному вигляді можна описати кортежем:

$$\text{ММ} = \langle \text{ТО}, \Phi, \text{С}, \text{В}, \text{П}, \text{Т}, \text{А}, \text{О}, \text{З} \rangle, \quad (1)$$

де ТО – множина класів технологічних об'єктів для яких може бути використана або адаптована математична модель; Φ – множина форм представлення математичної моделі; С – множина структур ММ; В – множина вимог, яким повинна задовольняти ММ; П – множина варіантів подальшого використання ММ; Т – множина точності ММ; А – множина адекватності ММ; О – множина обмежень, які накладаються на ММ при її побудові; З – множина задач, при вирішенні яких використовується ММ.

Отже, на основі проведених експертних оцінок можна зробити висновок про необхідність створення підсистеми, яка б допомагала науковцю / інженеру / проєктанту автоматизованих систем управління в підборі математичних моделей та математичного апарату для її створення при вирішенні промислових задач. Сьогодні на перше місце серед пошуково-дорадчих систем виходять системи, які базуються на онтологіях. Тому в своїй роботі автори зупинились на створенні саме такої системи.

Першим етапом необхідно класифікувати математичні моделі за різними ознаками. Математична модель є одним із різновидів «моделі» як такої, тому

запропонована класифікація бере свій початок з класу «модель». Місце математичної моделі в ієрархії моделей представлено на рис. 4.



Рис. 4. Місце математичної моделі в ієрархії моделей

Результати досліджень та їх обговорення Виділено основні підкласи математичної моделі, які наведені в табл. 3 та наступних. Центральним концептом цієї онтології є ММ. Модель є абстрактним або матеріальним відображенням об'єктів або процесів, адекватне досліджуваним об'єктам (процесам) щодо деяких заданих критеріїв. ММ – це наближений опис якогось класу явищ зовнішнього світу, виражений за допомогою математичної символіки.

У свою чергу ММ поділяються в залежності від функціональних та структурних особливостей на підвиди, вказані в стовбці 2 табл. 3. Такі особливості формують зв'язки або відношення R концептів X онтології. Враховуючи існуючі в технічній літературі різнотипні особливості ММ, автори виділяють п'ять узагальнених класів зав'язків між концептами: 1 – структура моделі; 2 – характер моделі; 3 – об'єктні властивості моделі; 4 – призначення моделі; 5 – математичні залежності.

3. Відношення та підкласи класу математичної моделі за структурними особливостями

№	<i>R</i> (відношення)	<i>X</i> (концепти)
1	В залежності від структури (ступінь наявності інформації про внутрішню структуру моделі)	Чорний ящик Білий ящик Сірий ящик
2	За вмістом ймовірнісних компонентів (наявність стохастичних залежностей)	Стохастична Детермінована
3	За належністю до ієрархічного рівня (характер структурного аналізу)	Мікрорівнева Метарівнева Макрорівнева

За структурними особливостями ММ виділяє групи, що відносяться до її структури, вмістом імовірнісних компонентів та ієрархічного рівня. Тут Моделі Чорного ящика – це моделі системи з відомими вихідними і вхідними параметрами та невідомою внутрішньою структурою. Досліджуючи відомі параметри за допомогою такої моделі можна отримати уявлення про внутрішню будову. Моделі Білого ящика – це моделі системи з відомими компонентами (відомими підсистемами, їх зв'язками, функціями системи, організаційно-ієрархічною структурою). Моделі Сірого ящика – поєднують часткову теоретичну структуру з даними для завершення моделі. Детерміновані моделі – це моделі які використовують в описі тільки не випадкові величини, а результати на виході однозначно визначаються керуючими вхідними впливами. Стохастичні (імовірнісні) моделі – використовують в описі випадкові величини, через дію випадкових факторів на виході можуть отримуватися різні результати. Мікрорівневе моделювання системи пов'язане з детальним описом кожного компонента системи, дослідженням її структури, функцій, взаємозв'язків. Макрорівневе моделювання полягає в ігноруванні детальної структури системи та вивченні лише загальної поведінки системи як єдиного цілого, а метою є побудова моделі системи через дослідження її взаємодії із зовнішнім середовищем. Метарівневе моделювання – моделювання системи пов'язане з описом міжсистемної взаємодії.

За способом подання виділено групу зв'язків, що включає ступінь абстракції моделі, характер подання інформації та характер даних (табл. 4). При цьому

Формальні моделі – це моделі, які задані на математичній або іншій формалізованій мові. Неформальні моделі – це набір таких інструментів, які здатні пояснити спостереження, але при цьому визначені недостатньо повно та не можна з високою точністю перевірити ступінь їхньої логічної взаємопов'язаності. Емпіричні моделі – це математичні вирази, що апроксимують (з використанням тих або інших критеріїв наближення) експериментальні дані про залежність параметрів стану системи від значень параметрів факторів, що впливають на них. Теоретичні моделі – певне теоретичне та схематичне уявлення про реальність (за допомогою ідеалізованих абстракцій, об'єктів). Імітаційні моделі – це різновид математичних моделей, що описують динамічні процеси в реальних системах і піддаються перевірці. Графові моделі – це ймовірнісні моделі, для яких умовні залежності між випадковими змінними виражено графом. Аналітичні моделі є системою таких співвідношень між заданими й шуканими величинами, які виражені математичними формулами в явному вигляді. Теоретико-множинні моделі – це моделі даних, в яких використовується апарат реляційної алгебри, реляційного обчислення, а операції над даними маніпулюються таблицями. Алгоритмічні моделі – це моделі в яких описується алгоритм функціонування системи в певний спосіб. Логічні моделі є складними булевими функціями, що залежать від ряду змінних, кожна з яких може приймати значення 0 або 1 у залежності від стану відповідного функціонального елемента об'єкта. Формальні моделі – це окремі типи моделей, подані у формальному, описовому вигляді, в який входять головні ознаки, за якими дана модель суттєво відрізняється від інших. В описі формальної моделі даються також правила її побудови, складові частини моделі, зв'язки між частинами, вигляд моделі в цілому. Змістовні моделі – це моделі, наповнені поняттями даної предметної області. Вони будуються на основі формальних моделей, що служать шаблоном, зразком для побудови змістовних моделей. Повні математичні моделі – це моделі, що відображають стан як системи, що моделюється, так і всіх її внутрішніх елементів. Макромоделі це моделі які адекватні щодо зовнішніх властивостей об'єкта дослідження

4. Відношення та підкласи класу математичної моделі за способом подання

№	<i>R</i> (відношення)	<i>X</i> (концепти)	
1	За способом отримання (характер подання інформації про об'єкт)	Формальна Неформальна Емпірична Теоретична	
2	За способом представлення властивостей об'єкта (характер моделі даних)	Графова Аналітична Теоретико-множинна	Імітаційна Алгоритмічна Логічна
3	За способом представлення об'єкту (ступінь абстракції)	Формальна Змістовна	
4	За ступенем деталізації (ступінь деталізації будови моделі)	Повна математична модель Макромодель	

Зв'язок об'єктних властивостей моделі включає характери опису, властивостей та елементів об'єкта (табл. 5). До перших належать класи: чисельні моделі – математичні моделі, основними елементами яких є конкретні чисельні значення характеристик системи, що моделюється, об'єкта; символні моделі – це логічні об'єкти, які замінюють реальний процес і виражають основні властивості його відносин за допомогою певної системи знаків або символів; каркасні моделі – моделі об'єкта в тривимірній графіці, що представляють собою сукупність вершин і ребер, яка визначає форму багатогранного об'єкта, що відображається. До других належать класи: топологічні моделі – є одними з математичних мов моделювання для опису функціональності системи та зазвичай зображується як граф, де вузли графа відображають функціональні можливості системи, а спрямовані дуги відображають топологічні відносини між ними; геометричні моделі, засновані на математичних методах аналітичної геометрії, які забезпечують введення і перетворення двовимірних і тривимірних об'єктів з урахуванням обмежень умов, пов'язаних з організацією взаємодії, можливостями засобів відображення, станом обчислювальної техніки (геометричне моделювання вивчає методи побудови числових моделей геометрії реальних чи уявних об'єктів, а також методи управління цими моделями); структурні математичні моделі – подають об'єкт моделювання з точки зору його складу та взаємозв'язку частин (елементів системи) між собою та з зовнішнім середовищем; кінематичне моделювання – моделювання руху без

урахування факторів, що його викликали (тільки наслідки), це одна з форм імітаційного моделювання; канонічні моделі – визначають структуру об'єкта управління та характеризують його зв'язки із середовищем, які здійснюються через входи та виходи керованої системи; функціональні моделі – призначені для вивчення особливостей роботи (функціонування) системи та її призначення у взаємозв'язку з внутрішніми та зовнішніми елементами; алгебраїчні моделі – є сукупністю взаємозв'язаних математичних та формально-логічних виразів, як правило, відображаючи реальні процеси та явища.

5. Відношення та підкласи класу математичної моделі за об'єктними властивостями моделі

№	<i>R</i> (відношення)	<i>X</i> (концепти)	
1	За типом значення (характер опису об'єкта)	Чисельна Символьна Змішана	
2	За характером властивостей (характер властивостей об'єкта)	Аналітична Каркасна Топологічна Геометрична макромодель Структурна математична модель Кінематична Гідравлічна	Канонічна Хімічна Геометрична Алгебраїчна Електрична Функціональна математична модель Механічна
3	За характером зміни змінних (характер елементів об'єкта)	Неперервна Дискретно-неперервна Дискретна	

У залежності від характеру функцій об'єкта, який описують моделі, вони можуть бути гідравлічними, механічними, хімічними, електричними тощо. Неперервні моделі – це математичні моделі, кожне невідоме яких змінюється неперервно в області свого визначення. Дискретно-неперервні моделі – математичні моделі, що містять як неперервні елементи, так і дискретні. Дискретні моделі – це математичні моделі, всі змінні і параметри яких є дискретними величинами.

За призначення математичні моделі поділяються на класи (табл. 6): імітаційні моделі – передбачають представлення моделі у вигляді деякого алгоритму,

виконання якого імітує послідовність зміни станів у системі і таким чином відображає поведінку системи або процесу, що моделюється; описові моделі – призначені для опису і пояснення спостережуваних факторів або прогнозування поведінки об'єктів; ігрові моделі – це спрощені математичні моделі конфліктних ситуацій з декількома сторонами конфлікту; оптимізаційні моделі – це моделі прийняття рішення, що містять показник ефективності, які необхідно оптимізувати за умови дотримання набору заданих обмежень. Також сюди відносяться моделі машинного навчання – це додатки штучного інтелекту, які дають можливість автоматично вчитися та вдосконалюватись на основі набутого досвіду. У свою чергу вони поділяються на контрольовано навчені та самостійно навчені моделі. Контрольоване навчання – це підхід до машинного навчання, заснований на використанні наборів даних. Такі набори даних використовуються для створення алгоритмів, орієнтованих на класифікацію даних або точне прогнозування результатів. Контрольоване навчання залежно від задач поділяється на два типи – класифікація та регресія. У задачах класифікації для отримання результатів модель використовує алгоритми класифікації такі як лінійні класифікатори, метод опорних векторів, дерева рішень, випадковий ліс та інші. У моделях регресії використовується алгоритм виявлення взаємозв'язку між залежними і незалежними змінними. До поширених алгоритмів регресійного аналізу належать лінійна регресія, логістична регресія та поліноміальна регресія. При неконтрольованому (самостійному) навчанні алгоритми машинного навчання використовуються для аналізу та групування наборів нерозмічених даних. Моделі неконтрольованого навчання використовуються для виконання завдань кластеризації та зниження розмірності. Кластеризація – це метод інтелектуального аналізу даних, що застосовується для групування нерозмічених даних виходячи з їх подібностей та відмінностей. Зниження розмірності – це метод навчання, який використовується в тому випадку, коли в певному наборі даних дуже багато ознак (або розмірностей). Він скорочує кількість вхідних даних до керованого, зберігаючи їх цілісність.

6. Відношення та підкласи класу математичної моделі за об'єктними властивостями

№	R (відношення)	X (концепти)	
1	Залежно від зв'язку між вхідними даними та досліджуваними властивостями (призначення моделі)	Функціональна Алгоритмічна	
2	Залежно від цілей моделювання (призначення моделі)	Імітаційна Дескриптивна Ігрова Оптимізаційна Модель машинного навчання Контрольовано навчена модель	Самостійно навчена модель Модель класифікації Модель регресії Модель зниження розмірності Модель кластеризації

Остання група зв'язків відноситься до особливих математичних залежностей та включає такі класи (табл. 7): лінійні моделі – моделі, що відображають стан або функціонування системи таким чином, що всі взаємозалежності в ній приймаються лінійними; нелінійна модель – математична модель, що відображає стан або функціонування таким чином, що всі або деякі взаємозв'язки в ній приймаються нелінійними, тобто містять нелінійні елементи; розподілені моделі – відображають нерівномірність розподілу фізичних та структурних параметрів; моделями із зосередженими параметрами – основні змінні процесу не змінюються в просторі, а тільки в часі. Також до цієї групи належать статичні моделі, які відображають стан об'єкта в певний фіксований момент часу та динамічні моделі – це моделі які описують зміну (динаміку) станів об'єкта. Моделі є стаціонарними, якщо вид їх функцій переходів і функцій виходів не змінюється з плином часу. Моделі, для яких не виконуються ці умови, називаються нестаціонарними. У залежності від типу нестаціонарності вони поділяються на параметрично-нестаціонарні та структурно-нестаціонарні.

7. Відношення та підкласи класу математичної моделі за математичними залежностями

№	<i>R</i> (відношення)	<i>X</i> (концепти)	
1	Залежно від зв'язку між вхідною та вихідною змінною (наявність нелінійних елементів)	Лінійна Нелінійна	
2	Залежно від параметрів (наявність просторової розподіленості об'єкту)	Зосереджена Розподілена	
3	Залежно від поведінки системи (характер структурної динаміки моделі)	Нестаціонарна Параметрично-нестаціонарна Структурно-нестаціонарна	Статична Динамічна Стаціонарна

Таким чином, отримано множину підкласів математичної моделі, яка описує технологічні процеси та комплекси за виділеними ознаками. Слід відмітити, що сформовані деякі підкласи перетинаються і структура не є ієрархічним деревом. Так, наприклад, клас Чорний ящик є надкласом всіх виділених підкласів машинного навчання. Крім того, деякі класи мають незамкнену множину підкласів, що може бути доповнена в подальшому. Однозначна інтерпретація екземплярів до конкретної множини концептів залежить від атрибутів екземпляру, що визначає особливості технологічного об'єкту, задачі розробки та вимог до моделі.

Висновки та перспективи. У роботі представлено перший етап побудови онтології математичних моделей для технологічних об'єктів, що буде використана для формування системи підтримки прийняття управлінських рішень на нижніх та середніх рівнях ієрархії промислового виробництва. Сюди відносять задачі автоматизованого управління технологічним процесом, комплексом, а також всі задачі рівня MES/MOM, що базуються на адекватних математичних моделях.

На основі проведених експертних оцінок визначено основні проблеми, з якими стикається розробник математичної моделі. Однією з основних складностей на початковому етапі є відсутність загальної класифікації різноманіття існуючих математичних моделей та єдиної інформаційної бази, де зібрані описи, призначення, задачі, для яких можуть бути застосовані ті чи інші види і типи. Це стало основою

для роботи над проведенням класифікації математичних моделей і створення онтологічного класифікатора математичних моделей.

Отримана класифікація складається з множини підкласів класу Математична модель, що знайшли своє відображення в науковій літературі та прикладних розробках. Визначено множину зв'язків, що складає основу поділу верхнього класу. До неї увійшли різні структурні особливості моделі та її цільове призначення. Частина класів перетинається, частина – ні, частина концептів входить в інші гілки онтології. Таким чином, отримана мережева структура не лише відображає більшість існуючих типів математичних моделей, а й може бути легко доповнена новими концептами.

Наступним етапом є реалізація сформованої онтології математичних моделей та перевірка її працездатності на основі запитів.

Список використаних джерел

1. Smart Manufacturing – Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI 4.0). Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html.
2. Illa, N., Sin, T. C., Fathullah, G. M., Rosmaini, A. (2018). Mathematical modeling of quality and productivity in industries: A review. AIP Conference Proceedings November 2018, 2030(1):020126. doi:10.1063/1.5066767.
3. Zaiets, N., Vlasenko, L., Lutska, N., Shtepa, V. (2022). Resource Efficiency Forecasting Neural Network Model for the Sugar Plant Diffusion Station. Automation 2022: New Solutions and Technologies for Automation, Robotics and Measurement Techniques, 151–161. doi:10.1007/978-3-031-03502-9_16.
4. Ljung, L. (1999). System identification: theory for the user. Prentice Hall PTR. 609.
5. Gresova, E., Svetlík, J. (2021). Mathematical modeling of the manufacturing sector's dominant part as a base for automation. Applied Sciences, 11, 3295. doi:10.3390/app11073295.
6. Korobiichuk, I., Ladanyuk, A., Vlasenko, L., Zaiets, N. (2018). Modern Development Technologies and Investigation of Food Production Technological Complex Automated Systems. Proceedings of 2-nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering ICMSC 2018. Amsterdam, Netherlands, 52–56. doi:10.1145/3185066.3185075.
7. Boss, B., et al. (2020). Digital twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0, an Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint. White Paper.

8. Akroyd, J., Mosbach, S., Bhave, A., Kraft, M. (2021). Universal digital twin – a dynamic knowledge graph. *Data-Centric Engineering*, 2, e14. doi:10.1017/dce.2021.10.
9. D'Amico, R.D., Sarkar, A., Karray, H., Addepalli, S., Erkoyuncu, J.A. (2022). Detecting failure of a material handling system through a cognitive twin. *IFAC-PapersOnLine*, 55 (10), 2725–2730. doi:10.1016/j.ifacol.2022.10.128.
10. ISO 20534: 2018 Industrial Automation Systems and Integration – Formal Semantic Models for the Configuration of Global Production Networks. Available at: <https://www.iso.org/standard/68274.html>.
11. Gal, A. *Ontology Engineering*. (2009). *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, Boston, MA. doi:10.1007/978-0-387-39940-9_1315.
12. Lutska, N., Vlasenko, L., Zaiets, N., Shtepa, V. (2021). Ontological aspects of developing robust control systems for technological objects. *ICO 2020: Intelligent Computing and Optimization, Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 1324, 1252–1261. doi:10.1007/978-3-030-68154-8_107.
13. Vlasenko, L. O., Lutska, N. M., Zaiets, N. A., Shyshak, A. V., Savchuk, O. V. (2022). Domain ontology development for condition monitoring system of industrial control equipment and devices. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 157. doi:10.15588/1607-3274-2022-1-16.
14. Wei, S., Yu, Z., Chen, F., Mao, C., Guo, J. (2015). The Expert Ranking Method Based on Listwise with Associated Features. In: Zhang, X., Sun, M., Wang, Z., Huang, X. (eds) *Social Media Processing. SMP 2015. Communications in Computer and Information Science*, 568. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-10-0080-5_18
15. Zhang, T., Harrington, K. B., Sherf, E. N. (2022). The errors of experts: When expertise hinders effective provision and seeking of advice and feedback. *Current Opinion in Psychology*, 43, 91-95. doi:10.1016/j.copsyc.2021.06.011.

References

1. Smart Manufacturing – Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI 4.0). Available at: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html.
2. Illa, N., Sin, T. C., Fathullah, G. M., Rosmaini, A. (2018). Mathematical modeling of quality and productivity in industries: A review. *AIP Conference Proceedings* November 2018, 2030(1):020126. doi:10.1063/1.5066767.
3. Zaiets, N., Vlasenko, L., Lutska, N., Shtepa, V. (2022). Resource Efficiency Forecasting Neural Network Model for the Sugar Plant Diffusion Station. *Automation 2022: New Solutions and Technologies for Automation, Robotics and Measurement Techniques*, 151–161. doi:10.1007/978-3-031-03502-9_16.
4. Ljung, L. (1999). *System identification: theory for the user*. Prentice Hall PTR. 609.
5. Gresova, E., Svetlík, J. (2021). Mathematical modeling of the manufacturing sector's dominant part as a base for automation. *Applied Sciences*, 11, 3295. doi:10.3390/app11073295.

6. Korobiichuk, I., Ladanyuk, A., Vlasenko, L., Zaiets, N. (2018). Modern Development Technologies and Investigation of Food Production Technological Complex Automated Systems. Proceedings of 2-nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering ICMSCE 2018. Amsterdam, Nitherlands, 52–56. doi:10.1145/3185066.3185075.
7. Boss, B., et al. (2020). Digital twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0, an Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint. White Paper.
8. Akroyd, J., Mosbach, S., Bhave, A., Kraft, M. (2021). Universal digital twin – a dynamic knowledge graph. Data-Centric Engineering, 2, e14. doi:10.1017/dce.2021.10.
9. D’Amico, R.D., Sarkar, A., Karray, H., Addepalli, S., Erkoyuncu, J.A. (2022). Detecting failure of a material handling system through a cognitive twin. IFAC-PapersOnLine, 55 (10), 2725–2730. doi:10.1016/j.ifacol.2022.10.128.
10. ISO 20534: 2018 Industrial Automation Systems and Integration – Formal Semantic Models for the Configuration of Global Production Networks. Available at: <https://www.iso.org/standard/68274.html>.
11. Gal, A. Ontology Engineering. (2009). Encyclopedia of Database Systems. Springer, Boston, MA. doi:10.1007/978-0-387-39940-9_1315.
12. Lutskaya, N., Vlasenko, L., Zaiets, N., Shtepa, V. (2021). Ontological aspects of developing robust control systems for technological objects. ICO 2020: Intelligent Computing and Optimization, Advances in Intelligent Systems and Computing book series, 1324, 1252– 1261. doi:10.1007/978-3-030-68154-8_107.
13. Vlasenko, L. O., Lutska, N. M., Zaiets, N. A., Shyshak, A. V., Savchuk, O. V. (2022). Domain ontology development for condition monitoring system of industrial control equipment and devices. Radio Electronics, Computer Science, Control, 1, 157. doi:10.15588/1607-3274-2022-1-16.
14. Wei, S., Yu, Z., Chen, F., Mao, C., Guo, J. (2015). The Expert Ranking Method Based on Listwise with Associated Features. In: Zhang, X., Sun, M., Wang, Z., Huang, X. (eds) Social Media Processing. SMP 2015. Communications in Computer and Information Science, 568. Springer, Singapore. doi:10.1007/978-981-10-0080-5_18
15. Zhang, T., Harrington, K. B., Sherf, E. N. (2022). The errors of experts: When expertise hinders effective provision and seeking of advice and feedback. Current Opinion in Psychology, 43, 91-95. doi:10.1016/j.copsyc.2021.06.011.

**MATHEMATICAL MODELS ONTOLOGY OF TECHNOLOGICAL
OBJECTS FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES. PART 1. FORMATION OF THE
BASIC CONCEPTS FOR THE SUBJECT AREA**

O. Omelchenko, N. Lutska, L. Vlasenko

Abstract. *The article substantiates the necessity of constructing ontologies of mathematical models for technological objects of industrial enterprises. For this, a survey was conducted and expert evaluations were obtained, which showed that there is currently no complete classification of existing mathematical models and corresponding ontologies in the field of industry. Experts also noted that the presence of such an ontology*

significantly facilitated their work in conducting research and work related to the creation of highly efficient production management systems based on models. Such models will include existing mathematical representations of technological processes, as well as methods for identifying their parameters. Based on the results of expert evaluations, Ishikawa' diagram was constructed, which reflects the factors affecting the development of a mathematical model and is the basis for the development of an ontology. Also, to create an adequate ontology, the place of the mathematical model in the hierarchy of existing models is determined. An important stage in the design of the ontology was the classification of existing mathematical models according to selected characteristics, which included the structure of the model, its character, its object properties, the purpose of the model and mathematical dependencies. The main concepts of the models are defined, which include classic and modern varieties of models for technological processes.

Key words: *mathematical model, ontology, concept, technological process, relationship, automation*