

УДК 004.42:65.012.3:512.55

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-10>

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ КАТЕГОРІЙ ПРИ КОНЦЕПТУАЛЬНОМУ ПРОЄКТУВАННІ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ «УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ»

Сагайда Павло Іванович,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4700-8160

Костіков Олександр Анатолійович,

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-3503-4836

Касьянюк Олександр Сергійович,

старший викладач кафедри цифрових

технологій та проєктно-аналітичних рішень

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-8215-0920

У статті розглядається проблема концептуального проєктування баз даних для предметної галузі «Управління проєктами» та аналізується її складність, що виникає за рахунок унікальності, тимчасовості та високого рівня невизначеності проєктів у різноманітних сферах діяльності. Традиційний підхід до моделювання, що базується на моделі «сутність-зв'язок» (ER-модель), хоч і є широко застосовуваним, має суттєві недоліки, такі як нездатність до підтримки високого рівня абстракції, що призводить до недосконалості таких інформаційних моделей для складних систем. Фундаментальна проблема ER-моделі полягає у її залежності від теорії множин, що обмежує виразну силу моделі під час опису складних бізнес-правил та відношень. Для подолання цих обмежень пропонується підхід, що ґрунтується на теорії категорій (ТК). ТК надає потужний і абстрактний апарат, який дає змогу моделювати не лише сутності (об'єкти), але й відношення (морфізми) як первинні елементи аналізу. Це забезпечує надійну формальну основу, що усуває двозначність і дає змогу уніфікувати різні типи даних (реляційні, XML, графові) в єдиній теоретичній рамці. У роботі описано, як основні поняття ТК, такі як об'єкти, морфізми, композиція та універсальні конструкції (наприклад, pullback), можуть бути використані для моделювання даних. Застосування комутативних діаграм дає змогу формалізувати складні бізнес-правила, такі як «Призначення ресурсу завданню в межах проєкту», що дає можливість перенести бізнес-логіку з рівня реалізації на рівень концептуального проєктування. Порівняльний аналіз показав, що категорійна модель є більш гнучкою, виразною та керованою порівняно з ER-моделлю, особливо в контексті еволюції схеми завдяки концепції функторів. Таким чином, дослідження доводить, що ТК є цінним інструментом для проєктування баз даних у складних предметних галузях, в тому числі для предметної галузі «Управління проєктами», забезпечуючи надійну та математично обґрунтовану основу для моделювання.

Ключові слова: теорія категорій, універсальні конструкції, концептуальне проєктування, база даних, ER-модель, управління проєктами, бізнес-правила.

Sahaida Pavlo, Kostikov Oleksandr, Kasianiuk Oleksandr. Using category theory in the conceptual design of a database for the "Project Management" domain

The article examines the problem of conceptual database design for the "Project Management" domain, analyzing its complexity arising from the uniqueness, temporality, and high level of uncertainty of projects in various fields of activity. The traditional modeling approach, based on the Entity-Relationship model (ER model), although widely used, has significant drawbacks, such as the inability to support a high level of abstraction, which makes these information models imperfect for complex systems. A fundamental problem with the ER model is its reliance on set theory, which limits the expressive power of the model in describing complex business rules and relationships. To overcome these limitations, an approach based on Category Theory (CT) is proposed. CT provides a powerful and abstract framework that allows for the modeling of not only entities (objects) but also relationships (morphisms) as primary elements of analysis. This provides a robust formal foundation that eliminates ambiguity and allows for the unification of different data types (relational, XML, graph) within a single theoretical framework. The paper

describes how the core concepts of CT, such as objects, morphisms, composition, and universal constructions (e.g., pullback), can be used for data modeling. The use of commutative diagrams allows for the formalization of complex business rules, such as "Assigning a resource to a task within a project", by shifting business logic from the implementation level to the conceptual design level. A comparative analysis showed that the categorical model is more flexible, expressive, and manageable compared to the ER model, especially in the context of schema evolution, thanks to the concept of functors. Thus, the research proves that CT is a valuable tool for database design in complex domains, including the "Project Management" domain, by providing a reliable and mathematically sound foundation for modeling.

Key words: category theory, universal constructions, conceptual design, database, ER model, project management, business rules.

Вступ.

Огляд предметної галузі «Управління проєктами». Управління проєктами є міждисциплінарною та комплексною практикою, що застосовує знання, навички, інструменти та методи для досягнення цілей проєкту в рамках заздалегідь визначених обмежень, таких як зміст, час та бюджет [1]. Ключові особливості проєктів – їхня унікальність, тимчасовість та високий рівень невизначеності – висувають специфічні вимоги до систем управління, зокрема їхніх інформаційних моделей. Успішна реалізація проєктів критично залежить від ефективного планування, організації та контролю над різноманітними сутностями та їхніми взаємозв'язками. Для побудови інформаційної системи, що підтримує управління проєктами, необхідно чітко визначити її основні компоненти, або сутності. До них належать Проєкт (Project), який є основним об'єктом управління; Завдання (Task), що становлять робочі одиниці проєкту; Ресурс (Resource), який може бути особою, обладнанням або матеріалом, призначеним для виконання завдань; Команда (Team), що об'єднує ресурси; Клієнт (Client), для якого виконується проєкт [2]. Взаємодії між цими сутностями, такі як «призначення ресурсу завданню» або «належність завдання до проєкту», є не менш важливими, ніж самі сутності, і вимагають точного моделювання.

Огляд класичного підходу до інформаційного моделювання. Для концептуального проєктування баз даних традиційно використовується модель «сутність-зв'язок» (ER-модель), запропонована Пітером Ченом у 1976 році. Це візуальний інструмент, який надає високорівневу концептуальну модель для зображення взаємозв'язків між об'єктами реального світу [3]. Модель базується на трьох фундаментальних концепціях.

1) Сутності (Entities). Реальні або абстрактні об'єкти, що представляють основні «іменники» предметної галузі, такі як Проєкт або Завдання. На діаграмі вони зображуються у вигляді прямокутників.

2) Атрибути (Attributes). Характеристики сутностей, наприклад назва або дата початку для проєкту. Атрибути зображуються у вигляді овалів.

3) Зв'язки (Relationships). Взаємодії між сутностями, що позначаються як дієслова, наприклад «працює на» між сутностями Ресурс та Завдання. На діаграмі вони позначаються ромбами, що з'єднують прямокутники лініями.

Розглянуті елементи моделі представлено в табл. 1.

Таблиця 1
Основні елементи ER-моделі та їх візуальне представлення

Елемент моделі	Опис	Візуальне представлення
Сутність (Entity)	Реальний або абстрактний об'єкт	Прямокутник
Атрибут (Attribute)	Властивість сутності	Овал (коло)
Зв'язок (Relationship)	Взаємодія між сутностями	Ромб

Критичний аналіз обмежень ER-моделі. Незважаючи на свою простоту та широке застосування, ER-модель має низку суттєвих недоліків, що обмежують її ефективність, особливо під час проєктування великих та складних систем. Головним обмеженням є її нездатність до підтримки високого рівня абстракції, що ускладнює представлення комплексних взаємозв'язків. За ступенем зростання системи діаграми стають надзвичайно заплутаними та важкими для читання, що ускладнює їх підтримку та усунення невідповідностей. Крім того, ER-модель зосереджується переважно на логічному дизайні і не охоплює фізичний рівень, що вимагає додаткових кроків для трансляції моделі в схему бази даних, що може призвести до розбіжностей. Фундаментальна проблема ER-моделі полягає у її залежності від теорії множин, де сутності трактуються як множини, а зв'язки – як відношення між ними. Таке представлення стає недостатнім, коли моделюється предметна галузь, де об'єкти не просто є пасивними наборами даних, а мають складну, взаємопов'язану

природу, наприклад Проєкт, який є одночасно і об'єктом, і контейнером для інших об'єктів. Ця залежність від множинної структури обмежує здатність моделі виражати складні бізнес-правила та обмеження інформаційно повно, що часто призводить до їх надмірного спрощення [4]. Такі обмеження, як, наприклад, «кожне Завдання повинно належати Проєкту», виражаються неформально (наприклад, через нотацію «crow's foot») і реалізуються лише на фізичному рівні (через обмеження посилювальної цілісності FOREIGN KEY з NOT NULL), залишаючись поза межами концептуальної моделі. Ця структурна обмеженість, що впливає з теорії множин, вимагає принципово нового, більш абстрактного та універсального математичного фундаменту. Для подолання цих недоліків необхідний підхід, який дає змогу моделювати не лише сутності, але й самі відношення як первинні, повноцінні об'єкти аналізу.

Обґрунтування застосування теорії категорій. Теорія категорій (ТК) є розділом математики, який вивчає властивості відношень між математичними структурами, абстрагуючись від їх внутрішньої будови. Вона надає потужний і абстрактний апарат, який ідеально підходить для моделювання складних взаємозв'язків та структур. На відміну від ER-моделі, ТК забезпечує «принципово математичну основу» для системної інженерії та моделювання [5]. Основні переваги застосування ТК для проєктування баз даних включають такі.

1) Формалізм. ТК надає надійну формальну основу, що усуває двозначність, притаманну неформальним діаграмам, і дає змогу зосередитися на точному значенні основних понять моделювання.

2) Абстракція. Вона дає змогу абстрагуватися від аспектів представлення, таких як конкретний тип бази даних, і фокусуватися на сутності відносин. Це дає змогу ТК виступати як універсальний шаблон для вирішення проблем, що повторюються в різних математичних та інженерних дисциплінах.

3) Уніфікація. Категорійний підхід здатен уніфікувати різні типи даних (реляційні, XML, графові) в єдиній теоретичній рамці.

Таким чином, ТК надає інструментарій, який дає змогу перенести бізнес-логіку з рівня реалізації (коду) на рівень концептуального проєктування. Це робить модель більш точною, верифікованою та гнучкою, що є критично важливим для динамічної та складної предметної галузі управління проєктами [6].

Метою дослідження є аналіз застосування теорії категорій як альтернативного підходу

до концептуального проєктування баз даних у предметній галузі «Управління проєктами» та порівняння її ефективності з традиційною ER-моделлю, а також дослідження того, як категорійна модель дає змогу формалізувати бізнес-правила та обмеження, що є складним завданням для ER-моделі.

Результати.

Частина I. Фундаментальні поняття теорії категорій для моделювання даних.

Визначення категорії, об'єктів та морфізмів. Категорія $\mathcal{C}$ є фундаментальною структурою в теорії категорій. Вона складається з двох класів [7]:

– клас об'єктів $Ob(\mathcal{C})$, елементи якого називаються об'єктами;

– клас морфізмів $Hom(\mathcal{C})$, елементи якого називаються морфізмами або стрілками; кожен морфізм f має початковий (source) об'єкт A та цільовий (target) об'єкт B ; запис $f : A \rightarrow B$ позначає « f є морфізмом з A у B ».

Ці два класи пов'язані двома основними аксіомами.

1) Композиція морфізмів. Для будь-яких двох морфізмів $f : A \rightarrow B$ та $g : B \rightarrow C$ існує їх композиція, яка позначається $g \circ f : A \rightarrow C$. Ця операція є асоціативною, тобто для $h : C \rightarrow D$, виконується $(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$.

2.) Тотожні морфізми (Identity). Для кожного об'єкта $A \in Ob(\mathcal{C})$ існує тотожний морфізм $1_A : A \rightarrow A$, такий, що для будь-якого $f : A \rightarrow B$, виконується $f \circ 1_A = f$, і для будь-якого $g : C \rightarrow A$, виконується $1_A \circ g = g$.

У моделюванні даних об'єкти категорії можуть відповідати сутностям (наприклад, Проєкт, Завдання), а морфізми – зв'язкам між ними. Композиція морфізмів дає змогу створювати складні шляхи зв'язків, а тотожні морфізми виражають факт, що кожна сутність є тотожною самій собі. Приклад категорійної діаграми з об'єктами категорії та морфізмами між ними наведено на рис. 1.

Універсальні конструкції. Універсальні конструкції, такі як добуток (product) та розшарований добуток (pullback), є ключовими поняттями теорії категорій. Вони дають змогу визначати об'єкти не через їхню внутрішню структуру (як це робиться в теорії множин), а через їхні відношення до інших об'єктів [8]. Це надзвичайно потужний інструмент для формалізації бізнес-правил та обмежень. Добуток (product) двох об'єктів A і B у категорії $\mathcal{C}$ – це об'єкт $A \times B$ разом з двома морфізмами-проєкціями $\pi_A : A \times B \rightarrow A$ та $\pi_B : A \times B \rightarrow B$. Ця конструкція є універсальною, оскільки для будь-якого іншого об'єкта X з морфізмами $f : X \rightarrow A$ та $g : X \rightarrow B$ існує єдиний

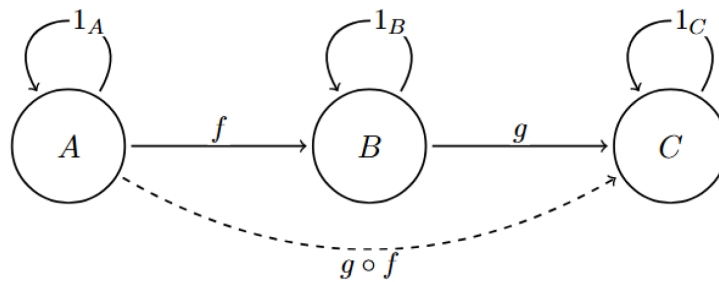


Рис. 1. Візуалізація об'єктів, морфізмів, композиції та тотожних морфізмів

морфізм $h : X \rightarrow A \times B$, такий, що наступна діаграма є комутативною: $g = \pi_B \circ h$ та $f = \pi_A \circ h$.

Розшарований добуток (pullback) є узагальненням добутку і однією з найважливіших конструкцій для моделювання залежностей (на рис. 2 наведено діаграму для цього об'єкта). Розшарований добуток двох морфізмів $f : A \rightarrow C$ та $g : B \rightarrow C$ – це об'єкт P разом з двома морфізмами $\pi_A : P \rightarrow A$ та $\pi_B : P \rightarrow B$, такими, що наступна діаграма є комутативною ($f \circ \pi_A = g \circ \pi_B$) і універсальною: $f \circ \pi_A = g \circ \pi_B$.

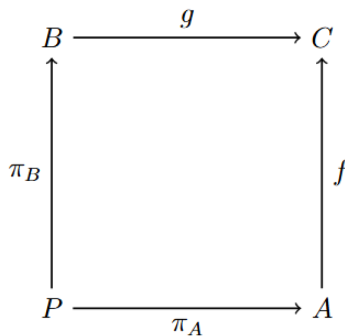


Рис. 2. Діаграма об'єкта «розшарований добуток» (pullback)

У контексті моделювання даних ER-модель виражає обмеження, такі як кардинальність, через неформальні позначення, що потім реалізуються на фізичному рівні (наприклад, обмеження FOREIGN KEY з NOT NULL). У категорійній моделі ці обмеження є частиною самого концептуального дизайну. Застосування розшарованого добутку (pullback) дає змогу формально визначити існування нового об'єкта, який є «перетином» двох відношень. Ця конструкція гарантує, що певний об'єкт може існувати лише за умови, що він задовольняє усі визначені відношення. Це є принциповою відмінністю, оскільки бізнес-правила стають не просто зовнішніми рекомендаціями, а фундаментальними алгебраїчними аксіомами моделі, що виражаються комутативністю діаграм [9].

Функтори та природні перетворення. Функтори є ключовим інструментом для

відображення між категоріями. Коваріантний функтор $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ – це відображення, яке зіставляє кожному об'єкту $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ об'єкт $F(X) \in \text{Ob}(\mathcal{D})$ і кожному морфізму $f : X \rightarrow Y$ – морфізм $F(f) : F(X) \rightarrow F(Y)$, що зберігає тотожні морфізми та композицію [9]. У контексті моделювання даних функтори виконують дві ключові ролі.

1) Моделювання екземпляра даних. Категорійна схема бази даних може бути представлена як категорія $\mathcal{S}$. Екземпляр даних (набір таблиць з конкретними записами) моделюється як функтор $I : \mathcal{S} \rightarrow \text{Set}$, який відображає кожен об'єкт-сутність X у множину $I(X)$ (наприклад, таблицю), а кожен морфізм-зв'язок f – у функцію $I(f)$ між цими множинами. Цей підхід елегантно розділяє абстрактну схему від конкретних даних.

2) Моделювання трансформації даних. Функтори також можуть описувати міграцію або перетворення даних між двома різними схемами. Функтори «зміни схеми» (change-of-schema functors) дозволяють формалізувати процес еволюції бази даних, що є значною перевагою перед традиційними, жорсткими моделями.

Природні перетворення, у свою чергу, є відображеннями між функторами, які зберігають стабільні відносини між різними трансформаціями даних, забезпечуючи узгодженість на високому рівні абстракції.

Частина II. Категорійна модель концептуального проєктування бази даних для управління проєктами.

Відображення предметної галузі на категорію-схему РМ. Для побудови категорійної моделі для предметної галузі «Управління проєктами» необхідно встановити відповідність між традиційними поняттями ER-моделі та категорійною теорією, результати такого аналізу наведено у табл. 2. Ця відповідність дає змогу переосмислити звичні концепції на більш абстрактному рівні.

Побудова базової категорії РМ. Побудова категорійної схеми для предметної галузі «Управління проєктами» починається

Таблиця 2

Відповідність понять ER-моделі та теорії категорій

Поняття ER-моделі	Поняття теорії категорій	Опис
Сутність (Entity)	Об'єкт (Object)	Представляє клас реальних або абстрактних речей
Зв'язок (Relationship)	Морфізм (Morphism)	Представляє відношення між об'єктами
Атрибут (Attribute)	Морфізм у категорію типів даних	Відображення об'єкта у категорію типів даних
Обмеження (кардинальність)	Типи морфізмів (моно/епі)	Виражається через властивості морфізмів (наприклад, мономорфізм для зв'язків ступеня 1:1 або 1:N)
Бізнес-правило	Комутативна діаграма / універсальна конструкція	Виражається як властивість композиції морфізмів

з формального визначення її об'єктів та морфізмів. Нехай наша категорія-схема позначається як $\mathcal{PM}$. Клас об'єктів $Ob(\mathcal{PM})$ включає:

- об'єкти, що відповідають основним сутностям предметної галузі: {Проект, Завдання, Ресурс, Команда, Клієнт};
- об'єкти, що відповідають базовим типам даних, які виступають у ролі атрибутів: {Текст, Дата, Ціле число, Десятькове число, ...}.

Клас морфізмів $HOM(\mathcal{PM})$ включає:

- морфізми, що моделюють «атрибути»: {назва: Проект $\rightarrow$ Текст, дата_початку: Проект $\rightarrow$ Дата, ...};
- морфізми, що моделюють «зв'язки»: {належить_проекту: Завдання $\rightarrow$ Проект, має_команду: Проект $\rightarrow$ Команда, ...}.

Моделювання обмежень та бізнес-правил за допомогою комутативних діаграм. Моделювання складних бізнес-правил за допомогою комутативних діаграм є однією з найважливіших переваг категорійного підходу. Ці діаграми є не просто візуальним допоміжним засобом, а формальним твердженням, що різні шляхи композиції морфізмів приводять до одного і того ж результату, подібно до рівнянь в алгебрі.

Сценарій 1: Завдання належить проекту.

Кожне Завдання повинно належати одному Проекту, але один Проект може мати багато Завдань. Це класичний зв'язок «один-до-багатьох». У теорії категорій це моделюється за допомогою мономорфізму. Морфізм $f: A \rightarrow B$ є мономорфізмом (ін'єктивним відображенням), якщо для будь-яких морфізмів $g_1, g_2: X \rightarrow A$, рівність $f \circ g_1 = f \circ g_2$ означає, що $g_1 = g_2$.

У контексті управління проектами морфізм $f: \text{Завдання} \rightarrow \text{Проект}$ є мономорфізмом. Якщо два різні «шляхи» збігаються до одного проекту через завдання, це означає, що завдання ідентичні. Ця властивість природно виражає бізнес-правило, що кожне завдання унікально пов'язане зі своїм проектом.

Сценарій 2: Призначення ресурсу завданню в межах проекту.

Це більш складний сценарій. Ресурс може бути призначений лише завданню, яке належить

проекту, де працює цей ресурс. В ER-моделі це правило залишається «зовнішнім» і часто вимагає додаткових перевірок на рівні застосунку. У категорійній моделі це правило формалізується за допомогою розширеного добутку (pullback). Визначимо два морфізми:

- $f: \text{Завдання} \rightarrow \text{Проект}$ («належить до»);
- $g: \text{Ресурс} \rightarrow \text{Проект}$ («призначений до»).

Ми хочемо створити новий об'єкт Призначення (TaskAssignment), який визначає, що Ресурс r може бути призначений Завданню t , лише якщо $f(t) = g(r)$. Це є гарним випадком для демонстрації застосування розширеного добутку під час моделювання. Об'єкт Призначення визначається як розширений добуток (pullback) морфізмів f і g .

Комутативність діаграми виражається формулою $f \circ \pi_A = g \circ \pi_B$. Ця рівність формально гарантує, що шлях від Призначення до Проекту через Завдання та шлях через Ресурс є однаковими. Це означає, що об'єкт Призначення може існувати лише за умови, що його Завдання та Ресурс належать одному Проекту. Категорійний підхід переносить бізнес-логіку з рівня реалізації (коду) на рівень концептуального проектування, що робить модель більш точною, менш схильною до помилок і легшою для верифікації.

Частина III. Порівняльний аналіз та практичні переваги.

Ключові переваги категорійного підходу. Перехід від ER-моделі до категорійного підходу у проектуванні баз даних не є простою зміною нотації. Він забезпечує такі фундаментальні переваги.

1) Формальна семантика. На відміну від ER-діаграм, які часто інтерпретуються інтуїтивно, категорійна модель надає математично обґрунтовану основу для моделювання даних, що усуває двозначність. Обмеження виражаються не як зовнішні правила, а як невід'ємні властивості самої структури.

2) Уніфікований фреймворк. Категорійний підхід дає змогу моделювати різні типи даних (реляційні, графові) в одній структурі. Ця здатність є критично важливою для сучасних

систем, які працюють з різнорідними джерелами даних.

3) Еволюція схеми. ER-модель є жорсткою, і внесення значних змін вимагає суттєвого перепроектування. Концепція функторів природно моделює зміну схеми, що робить процес еволюції бази даних більш керованим і формально визначеним.

4) Категорійна нормалізація. ТК надає можливість застосовувати теорії нормалізації для зменшення надмірності даних у більш загальний спосіб, що не обмежується лише реляційними базами даних.

Порівняння з ER-моделлю. Для повного розуміння переваг категорійного підходу було виконано структуроване порівняння з ER-моделлю, результати якого наведено у табл. 3.

ER-модель, будучи загалом візуальним представленням реляційної моделі, успадковує її обмеження, що впливають з теорії множин. Це пояснює її складності під час роботи з великими системами та нездатність до підтримки абстракції. Теорія категорій, натомість, абстрагується від внутрішньої природи об'єктів, що дає їй змогу зосередитись на універсальних «шаблонах проектування» для математики. Ця здатність дає можливість моделі ТК не бути прив'язаною до однієї конкретної реалізації, а виступати як справді концептуальна модель для мультимодельних систем [4].

Висновки. Проведене дослідження демонструє, що теорія категорій є потужною, гнучкою та надійною альтернативою традиційним методам концептуального проектування баз даних. Вона переносить акцент з опису «що є об'єктом» на «якими є відносини між об'єктами». Категорійна модель дає змогу формально виражати складну бізнес-логіку за допомогою комутативних діаграм та універсальних конструкцій,

таких як розшарований добуток, чого неможливо досягти в ER-моделі без додаткових, зовнішніх механізмів. Цей підхід забезпечує уніфікований фреймворк для різних типів даних та дає змогу більш елегантно керувати еволюцією схеми. Таким чином, застосування теорії категорій забезпечує надійну, математично обґрунтовану основу для концептуального проектування, що робить її цінним інструментом для складних предметних галузей зокрема управління проектами.

Можливості, що відкриваються з використанням категорійного підходу, не обмежуються лише моделюванням даних. Перспективні напрями подальших досліджень включають такі.

1) Моделювання процесів. Розширення категорійної моделі для опису не лише статичної структури даних, але й динамічних процесів та робочих потоків в управлінні проектами. Це може бути реалізовано за допомогою «моноїдальної категорії» (категорії, яка має додаткову структуру, що дає змогу «множити» об'єкти і морфізми).

2) Застосування монад. Дослідження застосування монад для моделювання «обчислень з ефектами» (якщо функція в інформаційній системі має якийсь ефект, наприклад зміну стану або обробку помилок, монада дає змогу обгорнути цей ефект у чисту функціональну оболонку, що робить його передбачуваним та керованим), що є особливо актуальним для обробки невизначеності та ризиків, притаманних управлінню проектами.

3) Розробка інструментів. Створення спеціалізованих програмних засобів для автоматизованої візуалізації категорійних діаграм та їх автоматичного перетворення на фізичні схеми баз даних.

Таблиця 3

Порівняння підходів ER та ТК

Критерій	ER-модель	Категорійна модель
Фундаментальна теорія	Теорія множин та відношень	Теорія категорій (абстракція, композиція)
Гнучкість	Жорстка, загалом орієнтована на реляційні БД, хоча з деякими обмеженнями може бути застосована для інших моделей зберігання даних	Гнучка, може моделювати різні типи даних (мультимодельна)
Виразна сила	Обмежена, схильна до надмірного спрощення	Висока, може формально виражати складні бізнес-правила (наприклад, через розшарований добуток)
Обробка обмежень	Неформальні позначення, реалізація на фізичному рівні	Формальні аксіоми, виражені комутативними діаграмами
Еволюція схеми	Складна, вимагає значного перепроєктування	Моделюється функторами зміни схеми, що робить її керованою
Ціль	Створення візуальної схеми для формалізації уявлень про роботу предметної галузі	Формальна, реалізаційно-незалежна модель для системної інженерії

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tooa E. G., Weaver P. The management of project management: A conceptual framework for project governance. *International Journal of Project Management*. 2014. Vol. 32, Issue 8. P. 1382–1394.
2. Alias Z., Zawawi E. M. A., Yusof K., Aris N. M. Determining Critical Success Factors of Project Management Practice: A Conceptual Framework. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 153. P. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.041>
3. Date C. J. An Introduction to Database Systems. Ed. 8.: Pearson, 2003. 1024 p.
4. Koupil P., Holubová I. A unified representation and transformation of multi-model data using category theory. *J Big Data*. 2022. Vol. 9, Issue 61. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00613-3>
5. Baclawski K., Simovici D. A., White W. 1994. A Categorical Approach to Database Semantics. *Math. Struct. Comput. Sci.* 1994. Vol. 4, Issue 2. P. 147–183.
6. Jiaheng Lu (2025). A Categorical Unification for Multi-Model Data: Part I Categorical Model and Normal Forms. <https://arxiv.org/abs/2502.19131> (дата звернення 20.08.2025).
7. Walter R. F. C. Categories and Computer Science. Cambridge: Cambridge Universities Press, 1991. 166 p.
8. Tarasov O., Sahaida P., Podlesny S., Vasylieva L. Categorical-ontological approach to information support of educational activities. *Conference on History, Theory and Methodology of Learning: 3rd International (ICHTML 2022)*, Kryvyi Rih, Ukraine, SHS Web Conf., 2022. Vol. 142. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214203005>
9. Spivak D. I. Category theory for the sciences. MIT Press, 2014. 435 p.

REFERENCES:

1. Tooa, E. G., & Weaver, P. (2014). The management of project management: A conceptual framework for project governance. *International Journal of Project Management*, 32, 8, 1382–1394.
2. Alias, Z., Zawawi, E. M. A., Yusof, K., & Aris, N. M. (2014). Determining Critical Success Factors of Project Management Practice: A Conceptual Framework. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 153, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.041>
3. Date, C. J. (2003). An Introduction to Database Systems. Ed. 8. Pearson.
4. Koupil, P., & Holubová, I. (2022). A unified representation and transformation of multi-model data using category theory. *J Big Data*, 9, 61. <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00613-3>
5. Baclawski, K., Simovici, D. A., & White, W. (1994). A Categorical Approach to Database Semantics. *Math. Struct. Comput. Sci.*, 4, 2, 147–183.
6. Jiaheng, Lu. (2025). *A Categorical Unification for Multi-Model Data: Part I Categorical Model and Normal Forms*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2502.19131>
7. Walter, R. F. C. (1991). *Categories and Computer Science*. Cambridge Universities Press.
8. Tarasov, O., Sahaida, P., Podlesny, S., & Vasylieva, L. (2022). Categorical-ontological approach to information support of educational activities. *Conference on History, Theory and Methodology of Learning: ICHTML 2022*. Kryvyi Rih, Ukraine, SHS Web Conf., Vol. 142. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202214203005>
9. Spivak, D. I. (2014). Category theory for the sciences. MIT Press.

Стаття надійшла: 11.08.2025

Стаття прийнята: 08.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

