

УДК 004.4

Архітектура комплексних інструментальних засобів предметно-орієнтованого математичного моделювання

В. І. Межуєв

Бердянський державний педагогічний університет, Україна

Розглядається архітектура інструментальних засобів, що реалізують інформаційну технологію предметно-орієнтованого математичного моделювання DSMM (Domain-Specific Mathematical Modelling). Аналізуються властивості метамodelей, що визначаються на кожному рівні архітектури інструментів DSMM з метою створення modelей предметних областей.

Ключові слова: предметно-орієнтоване моделювання, метамodelі, мови моделювання, предметні області.

Рассматривается архитектура инструментальных средств, реализующих информационную технологию предметно-ориентированного математического моделирования DSMM (Domain-Specific Mathematical Modelling). Анализируются свойства метамodelей, которые определяются на каждом уровне архитектуры инструментов DSMM с целью создания modelей предметных областей.

Ключевые слова: предметно-ориентированное моделирование, метамodelи, языки моделирования, предметные области.

The architecture of the tools implementing the informational technology of Domain-Specific Mathematical Modelling (DSMM) is considered. Properties of the metamodels, which are defined at each level of architecture of DSMM tools for the purpose of models development of universes of discourse are analyzed.

Keywords: domain-specific modeling, metamodels, modeling languages, universes of discourse.

1. Постановка задачі та її актуальність

Сутність інформаційної технології (ІТ) предметно-орієнтованого моделювання (*англ.* Domain-Specific Modelling, DSM) полягає у побудові modelей предметних областей (ПрО) шляхом розробки специфічних для ПрО мов моделювання (*англ.* Domain-Specific Language, DSL). Іншим терміном, що широко використовується у програмній інженерії для позначення DSL, є поняття метамodelі. Як метамodelь визначає синтаксис та семантику modelі предметної області, так і сама метамodelь може бути побудована у поняттях ще більшого рівня абстракції (мета-метамodelі). Найбільш відомим прикладом мета-метамodelі є MOF (Meta Object Facility) [1], що використовувалася консорціумом OMG [2] для визначення уніфікованої мови моделювання UML.

Зазначимо, що наразі існують кілька інструментальних засобів, що реалізують ІТ DSM (MetaEdit+, Eclipse DSL Toolkit, MS DSL Tools та ін.). Але не зважаючи на потужність ІТ DSM, її теоретичні засади та практична реалізація в існуючих інструментальних засобах страждає від багатьох недоліків, подолання яких пропонується здійснити у рамках інформаційної технології предметно-орієнтованого математичного моделювання:

В ІТ DSM відсутнє формальне визначення понять modelі, метамodelі та мета-метамodelі, а також способів специфікації алфавітів та граматик мов моделювання. Також неможлива комбінація (на рівні алфавіту та граматиками)

предметно-орієнтованої мови моделювання з існуючими мовами моделювання або програмування.

1. В ІТ DSM процес моделювання розглядається лише у лінгвістичному контексті, тобто як побудова валідних синтаксичних конструкцій у рамках певної граматики. В ІТ DSMM лінгвістичний аспект побудови моделей пов'язується з математичною теорією моделювання. Для цього метамоделі будуються на основі математичних теорій і включають не лише алфавіт та граматику, а і відповідні математичні методи.

2. Область застосування ІТ DSM є вузькою: інструменти DSM в основному призначені для генерації програмного коду. Визнаючи важливість такого підходу, ми розглядаємо результат процесу моделювання ПрО як математичну модель, до якої може бути застосований довільний метод (окремим випадком якого є генерація програмного коду).

3. В ІТ DSM неможлива зміна процесу моделювання. DSMM інструменти надають можливість визначення етапів та організації процесу моделювання, що найбільш повно відповідає специфіці ПрО.

4. В ІТ DSM розірваний зв'язок між процесом моделювання ПрО фахівцем ПрО та кінцевим результатом застосування інструменту DSM (власне, розв'язанням задачі). Інструменти DSMM є *комплексними*, тобто підтримують користувача на різних етапах розробки системи (починаючи з етапу висування вимог, специфікацій, архітектурного моделювання, кодування й т.ін.).

5. Комплексність інструментів DSMM також означає підтримку процесу розв'язання предметно-орієнтованих задач. Для цього надається можливість не лише декларативного, але й імперативного моделювання (тобто визначення способу розв'язання задачі і структури процесу обчислення).

Дана стаття присвячена визначенню архітектури комплексних інструментальних засобів, що реалізують інформаційну технологію предметно-орієнтованого математичного моделювання.

2. Порівняння архітектури MOF та DSMM

Як ми зазначали, мета-метамодель MOF була використана консорціумом OMG для визначення *уніфікованої* мови моделювання UML. Не зважаючи на семантичну протилежність універсального та предметно-орієнтованого підходів до моделювання ПрО, є доцільним виокремлення їх сильних сторін з метою інтеграції в інформаційній технології DSMM.

Розглянемо архітектуру MOF, що має 4 рівні. Верхній рівень (M3) є рівнем мета-метамоделі, тобто мовою для побудови метамоделей (що мають рівень M2). Рівень M2 (наприклад, мова UML) використовується для побудови конкретних моделей M1 (наприклад, UML-моделей). Нарешті, останнім рівнем є так званий «рівень даних» (M0). Він описує конкретні екземпляри моделей ПрО (див. рис. 1).

Зазначимо, що незважаючи на можливість побудови UML та її розширень (зокрема, SysML) у рамках мета-метамоделі MOF, такий підхід не можна віднести до предметно-орієнтованої технології моделювання. Ідея DSM полягає у розробці інструментальних засобів, що, по-перше, дозволяють експерту ПрО

власноручно розробити предметно-орієнтовану мову моделювання та, по-друге, здійснюють підтримку процесу побудови моделі фахівцем ПрО.

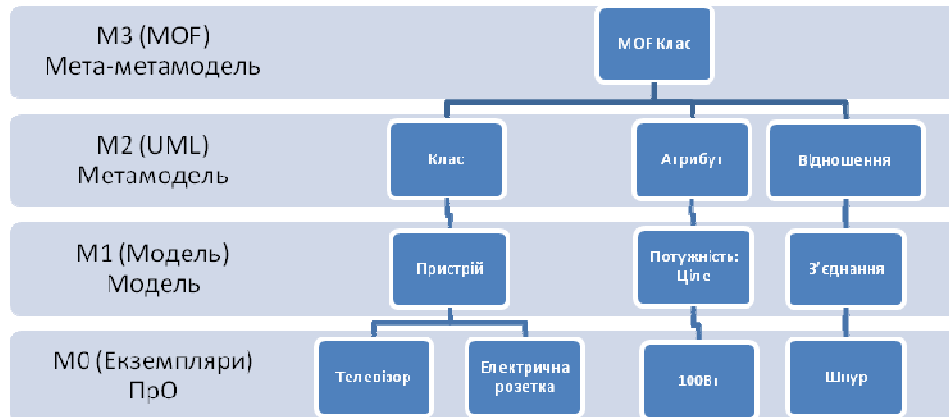


Рисунок 1. Рівні архітектури моделювання MOF

Особливістю ІТ DSMM є побудова метамоделей на засадах певної математичної теорії (математичного апарату), що дозволяє включити до метамоделі відповідні математичні методи і, таким чином, здійснити підтримку розв'язання специфічних для ПрО задач. ІТ DSMM також узагальнює різні метамоделі у рамках математичної теорії ще більшого рівня абстракції, а саме – теорії множин (див. рис. 2). Зауважимо, що такий підхід не збільшує кількість рівнів архітектури моделювання ПрО. Це є можливим завдяки розгляду найнижчого рівня (тобто екземплярів комп'ютерних об'єктів) як моделі ПрО (а не власне ПрО, як у MOF).

Наприклад, якщо розглядати як основу (мета-метамодель) метамоделі теорію графів, то вузол та ребро графу слугують базовими класами для породження предметно-орієнтованих класів метамоделі. (Атрибут у даному випадку розглядається як елемент вузла та ребра графу). У свою чергу поняття вузла та ребра графу узагальнюються у рамках теорії множин (що слугує рівнем M4, тобто мета-мета-метамоделлю).

3. Семантика рівнів архітектури DSMM

Незважаючи на те, що як ІТ DSMM, так і MOF визначають 4 рівні архітектури, їх семантика є суттєво різною. Значимо, що будь яка технологія моделювання повинна мати стартовою точкою розгляд предметної області. Лише на основі аналізу ПрО можна встановити властивості елементів ПрО, структуру їх відношень, визначити, який математичний апарат є доцільним для побудови адекватних дійсності моделей.

Саме тому першим блоком діаграми (див. рис. 3), що визначає рівні архітектури ІТ DSMM, є предметна область, яка розглядається як неструктурована множина елементів. Така архітектура дозволяє реалізувати основний напрямок застосування ІТ DSMM як *перехід від абстрактного до*

конкретного у процесі моделювання ПрО, тобто від мета-мета-метамоделі до мета-метамоделі, мета-метамоделі до метамоделі, від метамоделі до конкретної моделі ПрО.

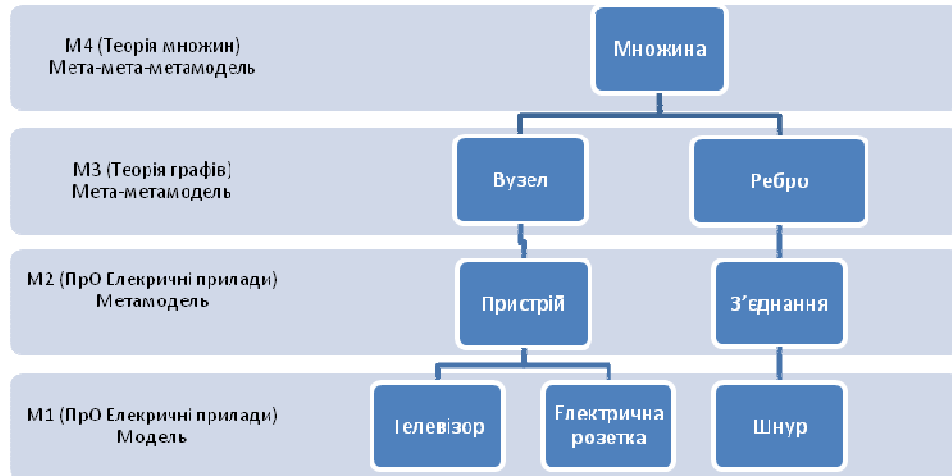


Рисунок 2. Рівні архітектури ІТ предметно-орієнтованого математичного моделювання

Таким чином, на першому етапі моделювання ПрО, та, відповідно, найвищому рівні абстракції – рівні мета-мета-метамоделі (М4), ми маємо справу з визначенням ПрО як множини елементів, без врахування структури та властивостей елементів множини. Наступним рівнем архітектури ІТ DSMM є мета-метамоделі, що визначає можливі структури моделей ПрО і відповідний математичний апарат. Мета-метамоделі слугує для створення метамоделей (мов моделювання), що мають специфічні для ПрО алфавіт та граматику і використовуються для побудови конкретних моделей ПрО.

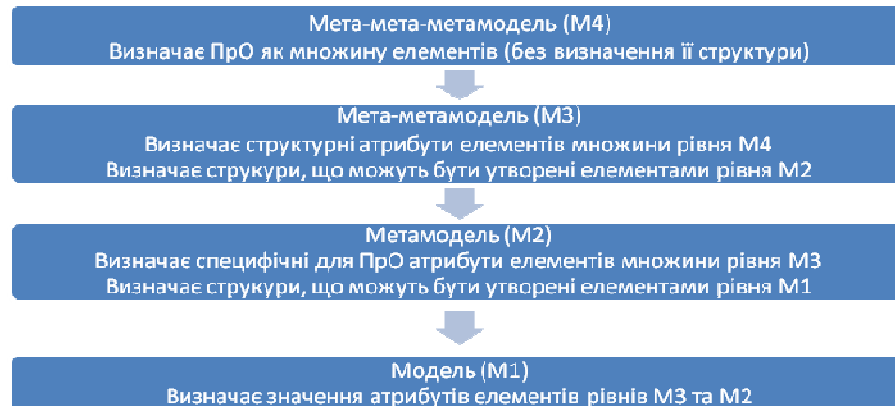


Рисунок 3. Семантика рівнів архітектури ІТ DSMM

Звідси випливають суттєві властивості IT DSMM:

1. Виділення різних рівнів архітектури й розробка специфічної для кожного рівня мови моделювання.
2. Ієрархічне упорядкування рівнів архітектури, що забезпечує сходження від загального до конкретного у процесі моделювання ПрО. Метамодель кожного з рівнів архітектури є мовою для побудови моделей на наступному рівні.
3. Поєднання лінгвістичного підходу до побудови метамodelей (мов моделювання) та загальнонаукового підходу до математичного моделювання ПрО.
4. Розгляд ПрО як сукупності елементів як перший рівень архітектури моделювання (М4).
5. Розгляд можливих структур ПрО (М3) та визначення специфічних для ПрО атрибутів (М2) як наступні рівні архітектури моделювання.
6. Узагальнення різних мета-метамodelей у рамках єдиної мета-мета-метамodelі.
7. Формулювання та формалізація властивостей всіх рівнів архітектури у рамках теорії множин.
8. Визначення на кожному рівні архітектури відповідних математичних методів (реалізованих за допомогою програмних функцій).
9. Дворівнева віртуалізація – виконання моделі ПрО за допомогою віртуальної машини рівня М2, що, у свою чергу, виконується на віртуальній машині рівня М3.
10. Підтримка користувачів різних рівнів та кваліфікації: математик створює мета-метамodelь, експерт ПрО розробляє мову моделювання (метамodelь) та визначає спосіб розв'язання класу задач, фахівець ПрО використовує мову для створення моделей ПрО та розв'язання виникаючих у ПрО задач (зокрема, генерації програмного коду). При цьому відповідальним за рівень М4 залишається програміст – розробник засобу IT DSMM.

4. Формалізація рівнів архітектури IT DSMM

Формалізація властивостей рівнів архітектури IT DSMM здійснюється у рамках теорії множин. Зазначимо, що кожен рівень IT DSMM може бути також визначений за допомогою лінгвістичного підходу, тобто як мова моделювання, що має відповідні алфавіт та граматику (такий підхід буде детально розглянутий нами у наступних роботах). Крім того, на кожному рівні IT DSMM визначаються методи, що реалізовані як програмні функції та формують API (Application Programming Interface) інструменту DSMM.

4.1. Мета-мета-метамodelь (М4)

Визначення М4. Описує предметну область D (від англ. *Domain*) як неструктуровану множину елементів.

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\} \quad (1),$$

де N – потужність множини D .

Семантика M4. Елементи рівня M4 не мають формального визначення, тобто можуть бути поняттями, об'єктами, функціями, властивостями та ін. предметної області D .

Алфавіт M4: D (всі елементи множини D).

Граматики M4: правило, що визначає належність елементу d до множини D :

$$d \in D \quad (2).$$

Методи M4: основні операції з елементом d множини D (створення, видалення, зміна імені, встановлення дозволів на використання та ін.).

Атрибути M4: ім'я елементу d .

Зазначимо, що з метою забезпечення однозначної ідентифікації кожен елемент ПрО (множини D) повинен мати ім'я, що, таким чином, визначається як основний атрибут елементу рівня M4. При цьому значення імені елементу D не повинне мінятися протягом застосування IT DSMM.

На наступних рівнях IT DSMM ідентифікація застосовується для одержання значень атрибутів елементу, наприклад, шляхом імплікації:

$$d.Name="Car" \rightarrow Car.Speed.Value=100\text{км/год} \quad (3).$$

Тобто з того факту, що ім'я ($Name$) елементу $d \in \langle Car \rangle$ (машина), впливає, що значення його атрибуту швидкість ($Speed$) дорівнює 100 км/год.

4.2. Мета-метамодель (M3)

Визначення та семантика M3. Задає структуру множини D за допомогою сукупності правил, що слугують граматикою для елементів рівня M2.

Відповідно класифікації Ніколаса Бурбаки [3] ми виділяємо такі основні типи структур:

- алгебраїчні структури;
- відношення порядку;
- топологічні структури.

Прикладами структур множини D є лінійна послідовність елементів, матриця, вектор, граф, розподіли фізичних величин на геометричному об'єкті та ін. Взагалі кажучи, граматикою рівня M3 може бути будь-який закон, що визначає структуру множини D .

Алфавіт M3. Структуровані підмножини множини D утворюють алфавіт рівня M3, символи якого слугують *типами* для елементів рівня M2 (та метатипами для елементів рівня M1). Під типом (і метатипом) ми вважаємо відносно стійку й незалежну підмножину елементів, що можуть бути виділені в D .

Таким чином, $M3$ визначає систему типів як множину структурованих підмножин $M4$ (предметної області D). Кожна така підмножина є типом (T) для елементів, що визначаються на рівні метамоделі (M2) та метатипом (MT) для елементів, що визначаються на рівні моделі (M1).

Визначення. Алфавіт M3 - множина метатипів MT .

$$\begin{aligned} MT &= \{MT_1, MT_2, \dots, MT_k\} \\ &= \{\{d_x, d_{x+1}, \dots, d_o\}, \{d_y, d_{y+1}, \dots, d_p\}, \dots, \{d_z, d_{z+1}, \dots, d_q\}\} \end{aligned} \quad (4),$$

де K – потужність множини MT .

$x=1..O, y=1..P, z=1..Q$; O, P, Q – потужності MT_1, MT_2 , та MT_K відповідно.

ГраMATика M3 включає два основні правила:

- правило виділення підмножини MT у множині D

$$MT \subset D \quad (5)$$

- правило завдання структури елементів підмножини MT .

Способи завдання структур в IT DSMM:

1. За допомогою атрибутів елементів множини D (наприклад, у рамках теорії графів, визначення ребра є водночас правилом з'єднання вузлів графу).

2. За допомогою додаткових правил, що визначають відношення елементів множини D (наприклад, розподіл фізичних величин задається на окремих множинах - геометричних об'єктах).

Атрибути M3. Атрибути, призначені для визначення структури множини D .

Методи M3:

1. Реалізовані у вигляді програмних функцій (API) основні операції на підмножинах – виділення підмножини у множині, зміна структури підмножини, створення підмножини, видалення підмножини, композиція підмножин ($A \cup B$, $A \cap B$, $A \setminus B$, \bar{A}).

2. Методи, специфічні для структури підмножин. Наприклад, для лінійних структур - знаходження мінімального й максимального значення, сортування елементів; для графів - пошук мінімального шляху й т.ін. Ці функції також входять до API інструментів DSMM, функції яких є специфічними для конкретних структур множин.

3. Функції візуалізації й маніпуляції

4.3. Метамодель (M2)

Семантика M2

1) Визначає специфічні для предметної області типи шляхом атрибутизації абстрактних метатипів M3.

2) Визначає граматику, тобто можливі способи з'єднання екземплярів M2.

3) Визначає методи розв'язання задач, що є специфічними для предметної області (з використанням API - програмних функцій рівнів M4 і M3).

Алфавіт: типи, що побудовані на основі елементів множини M3 (MT), та атрибутизовані властивостями, специфічними для ПрО.

$$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (6)$$

де L – потужність множини MT .

ГраMATика M2: правила, що визначають способи завдання структурних та предметно-орієнтованих атрибутів для побудови моделі на рівні M1.

Атрибути M2: специфічні для ПрО. Кожен елемент M3 розглядається як множина зафіксованих атрибутами специфічних для ПрО властивостей.

Методи M2: атрибутизація (додати атрибут, видалити атрибут), а також специфічні для ПрО алгоритми розв'язання задач над моделями рівня M1.

Зазначимо, що під атрибутизацією ми визначаємо операцію переведення множини MT у T без зміни структури елементів MT , тобто:

$$\mathit{Struct}(T_{attr}) = \mathit{Struct}(MT) \quad (7).$$

4.4. Модель (M1)

Визначення M1: екземпляри типів рівня M2, що мають конкретні значення структурних та предметно-орієнтованих атрибутів та процес обчислення, відповідний визначеному на рівні M2 алгоритму.

5. Архітектура інструментів IT DSMM

Дотримуючись класичного визначення Ніклауса Вірта [4], ми розглядаємо програму (програмну систему, ПС) як структури даних плюс алгоритми. З цього визначення випливає, що для комп'ютерного моделювання ПрО, властивості ПрО повинні бути перетворені в дані, а закони існування ПрО обчислюватися в алгоритмах ПС. Таким чином, з точки зору реалізації IT, інструменти DSMM надають типові структури даних і методи, застосовні побудови моделей ПрО. Для цього на рівні M3 IT DSMM визначаються метатипи як масиви різної розмірності, зв'язані списки, дерева, графи та ін. API рівня M3 також включає множину математичних методів, застосовних до цих структур даних.

Таблиця 1 відбиває відповідність архітектури IT предметно-орієнтованого математичного моделювання структурі комплексних інструментальних засобів, що реалізують IT DSMM. Таблиця акцентує увагу на переході від абстрактного до конкретного у процесі моделювання ПрО. Важливим аспектом IT DSMM є переважна роль семантики над синтаксисом: мета-метамодель задає синтаксис моделі ПрО, метамодель визначає семантику моделі ПрО.

Табл. 1. Відповідність архітектури інструментальних засобів структури IT DSMM

Мета-метамодель (синтаксис метамоделі)	Метамодель (семантика моделі ПрО)	Модель ПрО (програмна система)
Множина метатипів $\{MT\}$ - типових структур даних	Множина типів $\{T\}$ - властивості ПрО структуровані як $\{MT\}$	Значення величин, що визначають властивості ПрО
Множина методів обчислень над $\{MT\}$	Закони ПрО, зафіксовані в алгоритмах	Процес обчислення

6. Реалізація рівнів архітектури IT DSMM

Розглянемо більш детально програмну реалізацію рівнів архітектури IT DSMM:

M 1. Модель включає декларативну частину, а саме дані, які є екземплярами типів, визначених на рівні M2 та процес обчислення.

M 2. Метамодель включає декларативну частину: специфікації предметно-орієнтовані типів, граматику M1 й алгоритми розв'язання задач ПрО, а також віртуальну машину, що виконує алгоритми M2 для даних M1.

M 3. Мета-метамодель включає декларативну частину – специфікації метатипів та граматику для побудови M2, а також віртуальну машину, що

перевіряє відповідність M2 правилам граматики M3.

M 4. Мета-мета-метамодель: ядро й бібліотеки IT DSMM.

Як ми зазначали раніше, ключовою особливістю реалізації інструментів DSMM є дворівнева віртуалізація. Розглянемо властивості віртуальних машини рівнів M3 та M2.

Віртуальна машина M3 включає логічний двигун (синтаксичний аналізатор), що перевіряє відповідність структури метамоделі M2 правилам граматики, що визначені на рівні M3.

Віртуальна машина M2 включає два компоненти:

- логічний двигун (синтаксичний аналізатор), що перевіряє відповідність моделі M1 правилам граматики M2;

- імперативний двигун, що виконує алгоритм M2 для структур даних M1.

Звідси випливає, що інструменти DSMM зокрема комбінують такі класи ПС:

- синтаксичних аналізаторів, що перевіряють коректність розробки моделі;
- середовищ моделювання, що дозволяють визначити структуру Про та алгоритми розв'язання задач;
- віртуальних машин, що виконують алгоритми для визначних структур даних.

7. Висновки та напрямки подальших досліджень

1. Виділені рівні архітектури IT DSMM та визначені їх властивості. Перший рівень IT DSMM пов'язаний з ідентифікацією Про як множини елементів. Наступні рівні IT DSMM присвячені встановленню структури та властивостей елементів Про.

2. Здійснена формалізація рівнів архітектури IT DSMM у рамках теорії множин. Окрім типів та правил граматики, метамодель включає множину математичних методів, що слугують для побудови алгоритмів розв'язання виникаючих у Про задач. Розгляд Про через призму метамоделі дозволяє перетворити властивості Про в структури даних, а закони існування Про в методи обчислення властивостей.

3. Наші подальші дослідження будуть присвячені розгляду IT DSMM у лінгвістичному контексті (тобто як системи мов моделювання, що мають відповідні алфавіт та граматику).

ЛІТЕРАТУРА

1. ISO/IEC 19502:2005, Information technology. - Meta Object Facility (MOF). - ANSI. - 2007. - 292 p.
2. Object Management Group. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу. - www.omg.org
3. Бурбаки Н. Элементы математики. Алгебра. Модули, кольца, формы / пер. с фр. Г.В.Дорофеева; под ред. Ю.И. Манина. - М.: Наука, 1966. - 555 с.
4. Вирт Н. Алгоритмы + структуры данных = программы / Вирт Н. [Пер. с англ.]. - М.: Мир, 1985. - 406 с.