

#### План теми

1. Введення з методологію математичного моделювання транспортних процесів і систем .....	1
2. Оптимальне, раціональне та ефективне рішення .....	6
3 Аналітичні та імітаційні моделі, їх переваги та недоліки .....	9
4. Принципова різниця аналітичних та імітаційних моделей, як інструментів оптимізації транспортних процесів .....	17
5. Програмне середовище розробки імітаційних моделей AnyLogic .....	23

#### 1. Введення з методологію математичного моделювання транспортних процесів і систем

Керуючись життєвим досвідом та науковими знаннями, людина будує моделі – від паперових корабликів до картини світу. Чим вони багатші і чим точніше ми можемо ними оперувати, тим краще наша свідомість, наша «найважливіша модель» відповідає реальності і знаходить способи її зміни.

Моделювання - найефективніший засіб підтримки прийняття рішень, а за словами Річарда Докінза – «один з найцікавіших способів передбачати майбутнє».

Теоретичні передумови цього твердження формувалися протягом століть. В основу математичного моделювання лягли: математичний аналіз, теорія ймовірностей, чисельні методи, теорія подоби. У ХХ ст. з'явилася основа практичного застосування моделей: математичне програмування; теорія масового обслуговування; теорія алгоритмів; теорія систем; кібернетика.

## Основи теорії транспортних процесів і систем

2

Інша, «фактологічна», основа моделювання – стрімко зростаючий потенціал знань фундаментальних і прикладних наук.

У поєднанні з сучасним технологічним проривом ці основи створюють надзвичайні можливості побудови моделей, обмежені лише сміливістю дослідника. Перерахуємо тільки зловоденні глобальні теми, які проходять безперервну перевірку моделюванням: економіка, політика, екологія.

Моделювання впевнено допомагає зрозуміти, як улаштований світ. Можна сподіватися, що з його допомогою ми колись дізнаємося, як працює і наша «найважливіша модель».

Моделювання є одним із найбільш розповсюджених та доступних способів вирішення прикладних завдань. У більшості випадків рішення проблеми не можна знайти шляхом проведення натурних експериментів: будувати нові об'єкти – логістичні термінали, транспортні мережі, аеропорти, лікарні, заводи. Руйнувати або вносити зміни в уже наявну інфраструктуру може бути занадто дорого, небезпечно або просто неможливо. У таких випадках розробляється модель реальної системи: формалізуються її процеси та фізична архітектура, наприклад аналітичними залежностями, – математичними виразами.

Даний процес має на увазі перехід на певний рівень абстракції: опускаючи несуттєві, на погляд експериментатора, деталі, враховуються тільки те що є важливим. В результаті створюється модель, яка завжди спрощено копіює – моделює, симулює, відображає процеси – об'єкти та предмети реального світу (рис. 1).

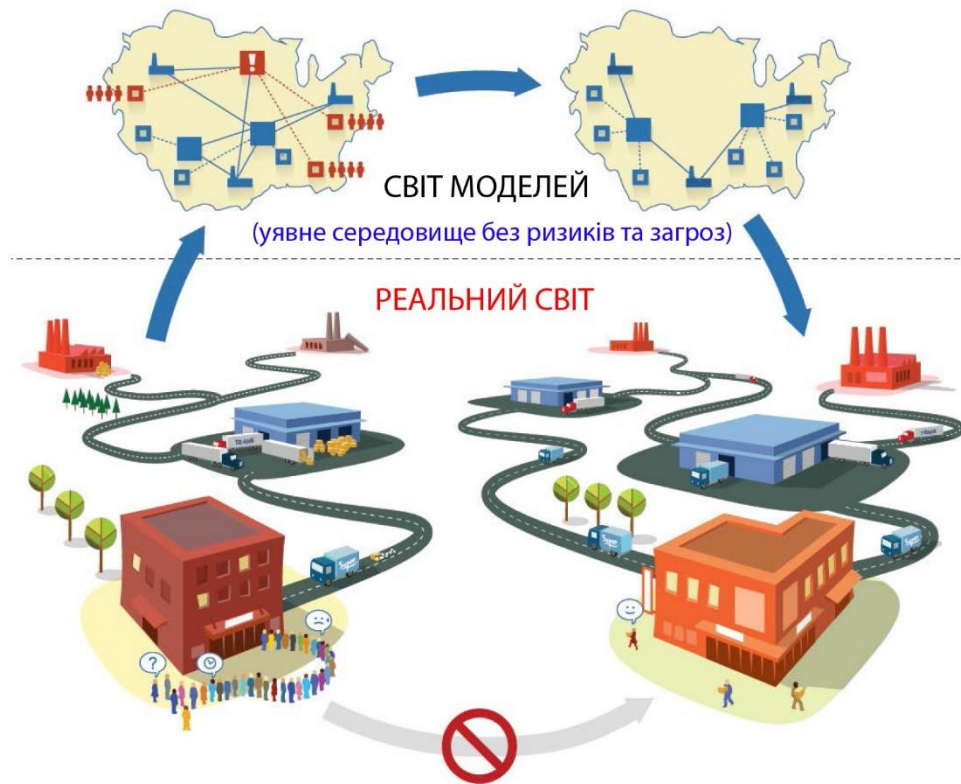


Рисунок 1 Сутність моделювання

Залежно від поставленого завдання, способу створення і предметної області розрізняють безліч видів моделей (рис. 2).

Особливої уваги при вивченні транспортних процесів та систем заслуговують математичні моделі, що робить теорію транспортних процесів та систем підрозділом *прикладної математики*. У математичних моделях за допомогою набору умовних символів та особливих методологій робиться опис (формалізація) того, як це працює (рис. 3 – 5). Класифікація математичних моделей ґрунтується на методах та відповідних математичних інструментах:

## Основи теорії транспортних процесів і систем

4

По області  
використання

• навчальні, досвідчені, ігрові, імітаційні, науково-дослідні;

По часовому  
фактору

• статичні і динамічні;

За формою  
представлення

• математичні, геометричні, словесні, логічні, спеціальні  
(ноти, хімічні формули і т.п.);

За способом  
представлення

• інформаційні (нематеріальні, абстрактні) і матеріальні;

Рисунок 2 Види моделей



Рисунок 3 Ментальна модель: уява  
(візуалізація) «в умі» про те, як це  
працює



Рисунок 4 Фізична модель:  
масштабована копія реального  
фізичного об'єкта. Копія того, як це  
працює.

1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• лінійні</li> <li>• нелінійні</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• статичні</li> <li>• динамічні</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• детерміновані</li> <li>• стохастичні (ймовірні)</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• дискретні</li> <li>• безперервні</li> </ul>

Рисунок 5 Типи математичних моделей

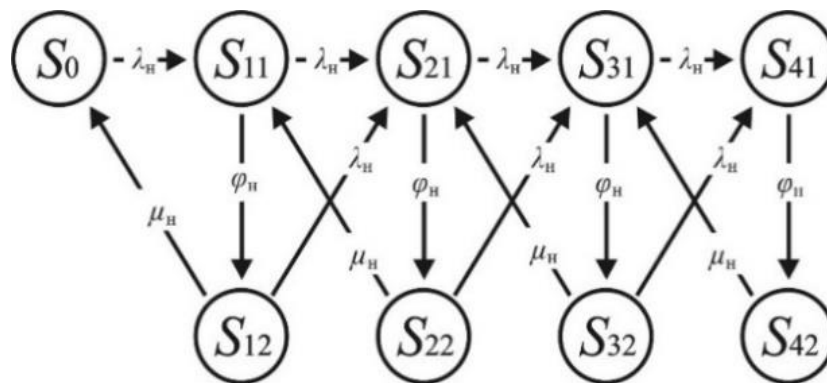


Рисунок 6 Графічна інтерпретація станів системи

Аналітична інтерпретація станів системи:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_{12}\mu_n = P_0\lambda_n, \\
 P_0\lambda_n + P_{22}\mu_n = P_{11}\lambda_n + P_{11}\varphi_n, \\
 P_{12}\lambda_n + P_{12}\mu_n = P_{11}\varphi_n, \\
 P_{11}\lambda_n + P_{32}\mu_n + P_{12}\lambda_n = P_{21}\lambda_n + P_{21}\varphi_n, \\
 P_{21}\varphi_n = P_{22}\lambda_n + P_{22}\varphi_n, \\
 P_{31}\lambda_n + P_{31}\varphi_n = P_{21}\lambda_n + P_{42}\mu_n + P_{22}\lambda_n, \\
 P_{32}\lambda_n + P_{32}\varphi_n = P_{31}\varphi_n, \\
 P_{31}\lambda_n + P_{32}\lambda_n = P_{41}\lambda_n, \\
 P_{42}\lambda_n = 2P_{41}\varphi_n, \\
 P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} = 1.
 \end{array} \right.$$

Рисунок 7 Аналітична інтерпретація станів системи.

### 6

По суті математичні моделі є самим дієвим з доступних інструментів пошуку: нових знань про відомі і навіть невідомі процеси та явища; наукового пізнання та пошуку раціональних рішень прикладних завдань. Використовуючи широкий інструментарій математичного моделювання фахівець вирішує поставлені завдання у захищеному від ризиків та небезпеки світі моделей, де є можливість безпечно помилятися, ризикувати, повертатись в минуле і, за необхідністю, починати все з початку.

### План теми

## 2. Оптимальне, раціональне та ефективне рішення

**Оптимальне** (від лат. *Optimus* - найкращий) рішення – рішення, яке з тих чи інших причин є найкращим серед інших.

У техніці оптимальний це найкращий варіант (рішення, вибір, ...) серед допустимих, при наявності правила переваги одного іншому. Таке правило називається критерієм оптимальності, а мірою переваги будуть служити показники якості. Наявність оптимального варіанту можливий при дотриманні двох умов:

- наявності хоча б одного критерію,
- наявності не менше двох порівнюваних варіантів (необхідність здійснення вибору).

Кожен вибір кращого варіанту конкретний, оскільки проводиться на відповідність певним критеріям. Отже, говорячи про оптимальний варіант, завжди потрібно вказувати ці критерії (тобто «оптимальний за критерієм (критеріями)...»). І те, що може бути оптимальним при одному критерії, не обов'язково буде таким при іншому. Наприклад, залізнична станція, «оптимальний час обробки (швидкості пропуску)», не обов'язково буде

## Основи теорії транспортних процесів і систем

7

«оптимальним за переробною спроможністю» або «собівартістю переробки вагонів».

Оптимальне рішення є результатом одного з видів вибору (критеріального вибору). Вивченням проблем, пов'язаних з вибором оптимальних рішень займаються теорія дослідження операцій і теорія прийняття рішень.

Приклад (рис. 1.4). операційні витрати сортувальних станцій, при організації роботи технологічної лінії із пропуску транзитних поїздів. Обсяг роботи – незмінний. Локомотивний парк та кількість приймально-відправних колій – варіативні. Критерій оптимізації – сукупні операційні витрати (обмежено значенням 9), рис. 1.7:

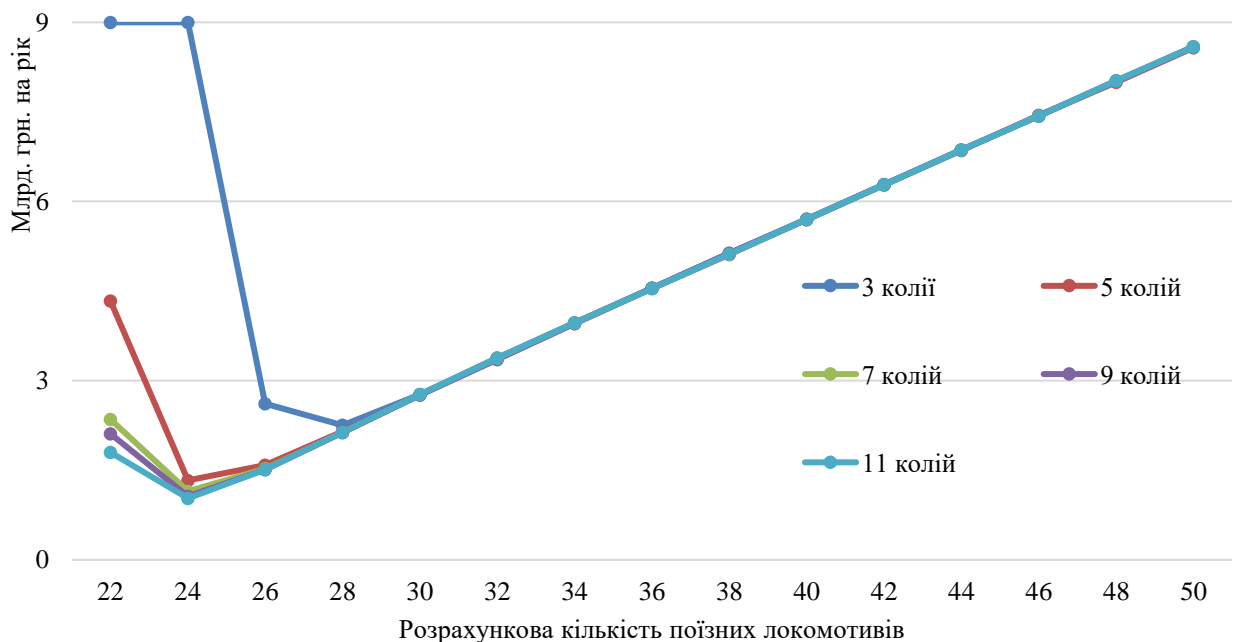


Рисунок 7 Оптимальне значення рівня операційних витрат залізничної транспортної системи залежно від розрахункового парку поїзних локомотивів

**Раціональність** (від лат. Ratio - розум) – термін, в самому широкому сенсі означає розумність, свідомість, протилежність ірраціональності. Ця категорія є близькою за значенням поняттям «здоровий глузд», «розумний

## Основи теорії транспортних процесів і систем

8

підхід». У розрізі даної теми – науковий підхід через встановлення закономірностей при вивченні причинно-наслідкових зв'язків.

Приклад (рис. 7). На обраний показник (*результат, наслідок*) найбільше впливає (*причина*) кількість поїзних локомотивів, а не кількість приймально-відправних колій.

**Ефективність** (лат. *Efficientia*) - співвідношення між досягнутим результатом і використаними ресурсами (стандарти ISO). Має найширше застосування у прикладних процесах, у тому числі транспортних, оскільки включає в себе і оптимальність і раціональність.

Під *ресурсами* можна розуміти будь-які виробничі ресурси, наприклад активи підприємств: капітал, вагонний парк, локомотивний парк, інвестиції, робочий час робітників та інше. Під *результатом* – кінцевий критерій ефективності: операційні витрати, собівартість, фактичне задіяння вагонів або локомотивів, витрачений час, отримана переробна, пропускна або провізна спроможності, тощо.

Приклад (рис. 8). Одним із головних і важливих критеріїв ефективності організації залізничних транспортних систем є коефіцієнт ефективності капіталовкладень. Визначається як відношення сукупних (річних) операційних витрат до сукупних капіталовкладень в даний варіант організації залізничної транспортної системи. У даному прикладі оптимуми показника на відміну від рис. 7 досягаються при іншому значенні розрахункового парку поїзних локомотивів.

**Показники технологічної ефективності.** Критеріями ефективності організації транспортних процесів та систем як правило виступають якісні показники. Наприклад: простої вагонів на станціях, оборот вантажних вагонів, маршрутний (дільничний) оборот локомотивів. Важливим є «розкладення» зазначених показників на складові:

- «продуктивний» та «непродуктивний» простій. Наприклад загальний час обороту вагонів складається із 82 – 90 % простоїв, та 10 - 18 % руху. З 82



## Основи теорії транспортних процесів і систем

9

– 90 % простоїв приблизно 60 – 70% «непродуктивний» простій в очікуванні технологічних операцій через зайнятість елементів та пристроїв обслуговування (колій, локомотивів та ін.);

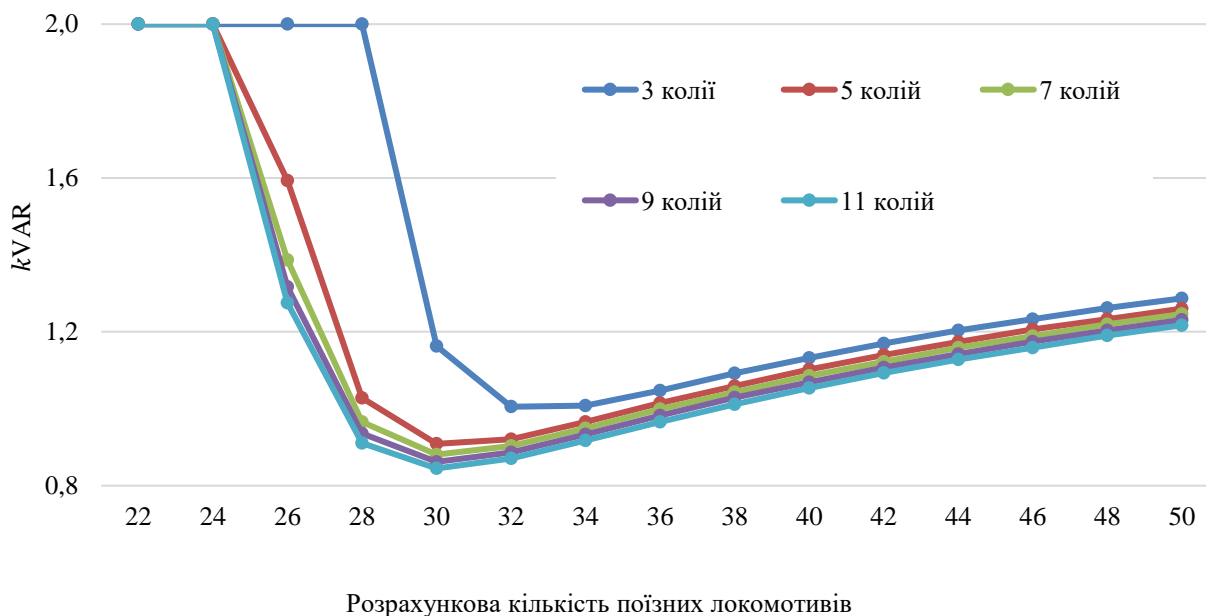


Рисунок 8 Значення показника ефективності капіталовкладень у спорудження залізничної транспортної системи залежно від розрахункового парку поїзних локомотивів

- на інфраструктуру та «неінфраструктуру» складові. Наприклад оборот вантажного вагону складається із часу знаходження на під'їзних коліях (приватна територія, відповідальність власника колій, вагонів) і коліях загального користування (відповідальність залізниці).

### План теми

### 3 Аналітичні та імітаційні моделі, їх переваги та недоліки

Моделювання дає імовірну інформацію про деякому фрагменту реальності. Після певних перевірок вона може виявитися істинною або хибною і вимагати побудови нових моделей.

У науці, поряд зі спостереженням, виміром, експериментом і порівнянням, ця процедура виступає як один із загальнонаукових методів. Проте моделювання можливе як особливий інтегруючий метод. Його ефективність та універсальність зростають у міру розвитку інформаційних технологій. З різних причин об'єкт може бути недоступний (занадто малий або великий, далеко розташований, коштовний, припинив існування, наприклад, в результаті аварії). Виняткова користь моделювання полягає в тому, що можна експериментувати не з самою системою, а з його аналогом – моделлю.

Моделювання - процес відображення властивостей одного об'єкта (оригіналу) в іншому об'єкті (моделі). Це можуть бути об'єкти «як є» в цілому та (або) їх окремі сутності – процеси та явища. Явища – наприклад, поведінка тварини, стану погоди – розглядаються як складні процеси.

В основу моделювання закладено процедуру формалізації – переклад властивостей об'єкта на мову понять предметної галузі, алгоритмів та математики.

Подібність моделі об'єкту. Об'єкт і модель перебувають у відношенні подібності. Тобто модель за якимись ознаками повинна бути подібна до об'єкта, що вивчається. Це явище називають ізоморфізмом (від грец. *isos* - рівний і *morphe* - форма). Розрізняють три види подоби.

Перший вид подібності – подібне масштабування.

Приклади такої подібності: моделі автомобілів, літаків, кораблів споруд тощо.

Другий вид подоби – непряма подоба (математична аналогія). Вдалий математичний аналог з інших областей знань може сильно спростити побудову. Відтак, дуже багато фізичних процеси можуть бути описані рівняннями, загальний вигляд яких:

$$q = -Q \operatorname{grad} x; \quad (1)$$

Аналогічні закони Кулону та всесвітнього тяжіння. Прикладом також може бути подібність електричних і механічних явищ.

Третій вид подоби – умовна подоба чи подоба за згодою. Прикладами є когнітивні моделі (рис. 9), географічні карти, масштабовані креслення споруд, будівель, структурні схеми (моделі системного аналізу). При цьому зовні схожість об'єкта та моделі може не дотримуватися.

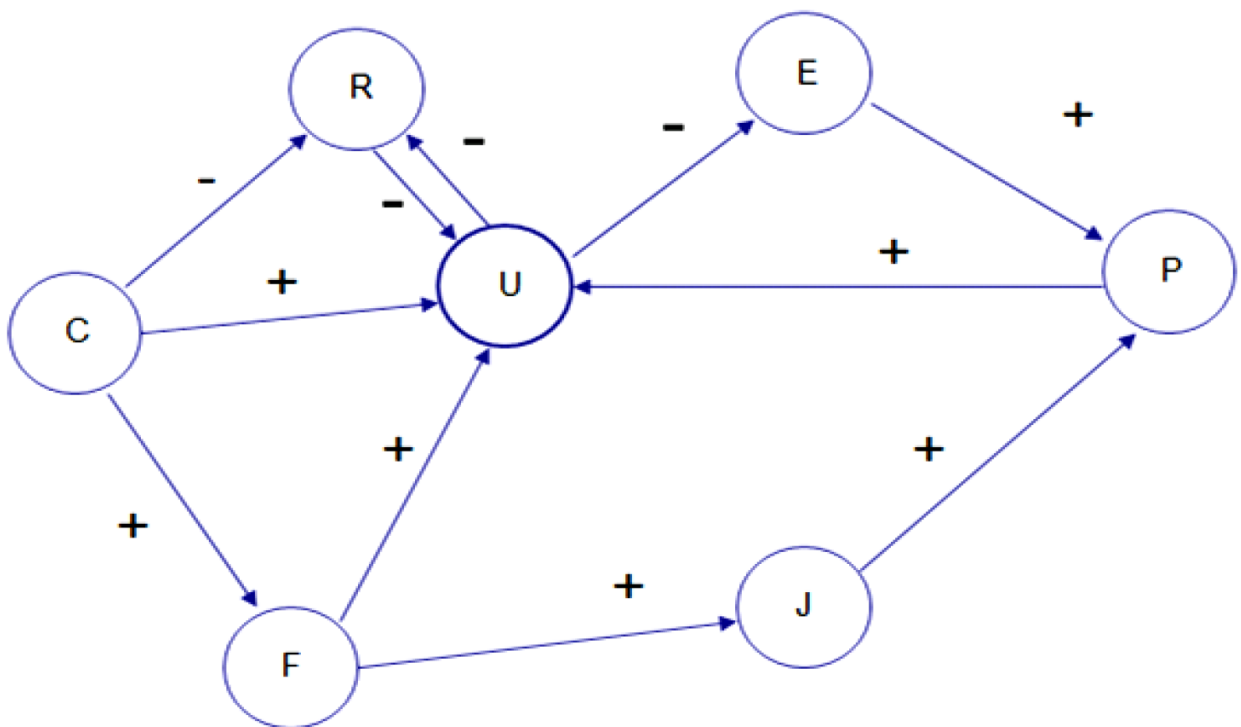


Рисунок 9. Когнітивна модель споживання промислової продукції (енергії, металів тощо): + - позитивні зв'язки (впливи); - негативні зв'язки (впливи).

Таким чином, об'єкт моделювання та модель можуть бути будь-якої природи – матеріальними чи абстрактними. Наприклад, макет літака – це матеріальна модель. Схема виробництва – абстрактна модель. Рівняння фізики – це опис абстракцій різних явищ матеріального світу. Моделі можуть бути абстракціями інших моделей. Спадкування (створення одних класів з

урахуванням інших) в об'єктно-орієнтованому програмуванні найбільш характерний приклад таких побудов.

*Адекватність моделей.*

Вигляд та властивості майбутньої моделі визначаються цілями дослідника, який використовує цей інструмент. У моделі відображаються властивості об'єкта, що відповідають цим цілям, які визначають рівні деталізації моделі. В першу чергу повинні бути визначені *суттєві* властивості оригіналу, що характеризують його як проблему, яку потрібно вирішити за допомогою моделі.

При цьому варто пам'ятати, що знати *всі* властивості предмета дослідження не можна. До того ж не забуватимемо, метод – це інструмент, а універсальних інструментів не буває. Чи означає це, що моделювання – ненадійний помічник? Ні. По-перше, існує принцип множинності моделей. Відповідно до нього можна, інколи – необхідно побудувати кілька моделей, що дозволяють розглянути об'єкт як проблему з різних позицій. До відповідних рішень (моделей) можна йти за допомогою різних підходів. Наприклад, створення моделі поведінки людини залежатиме від розробки різних цілей:

- 1) домогтися антропоморфної кінематики комп'ютерної моделі тіла людини;
- 2) одержати модель характерних психічних реакцій людини;
- 3) змодельовати реакції різних соціальних груп людей.

По-друге, існують спеціальні процедури перевірки, чи модель є точним поданням реальної системи, тобто, чи *адекватна* модель системі. При *верифікації*, тобто. Для перевірки достовірності моделі визначається, чи правильно концептуальна модель (модельні припущення) перетворена на комп'ютерну програму.

*Валідація* – це процес, що дозволяє встановити, чи є модель точним уявленням системи для конкретних цілей дослідження.

Визначальним моментом у цих процедурах є положення: модель і її результати достовірні, якщо керівники проекту визнають їх «правильними». У результаті, якщо модель «адекватна», її можна використовувати для прийняття рішень щодо системи, що вона представляє, ніби вони приймалися виходячи з експериментів із реальною системою.

По-третє, підсумковий результат (тобто «хороша» або «погана» модель вийде) залежить від особистості розробника. Моделювання, як метод наукового пізнання, передбачає творчий підхід до об'єкта та цілей дослідження.

У цьому виді наукового виробництва не обійтися без розвиненої уяви, вміння аналізувати та робити узагальнення. Хороші моделі – це «міні теорії» та їх створення потребує нестандартного мислення.

*Системний підхід у моделюванні.*

Матеріальні сутності – це сукупність взаємопов'язаних та взаємодіючих елементів, що утворюють системи різного рівня складності.

*Топологічна складність* визначається кількістю елементів та зв'язків. *Функціональна складність характеризується* процесами (поведінкою) системи та її елементів. За цими ознаками можна знайти положення даного об'єкта в ієрархії систем (аж до світової) та сформулювати предметну область моделювання.

На нижніх рівнях панують індивідуальні поведінки, фіксовані фізичні зв'язки, точні розміри, відстані, швидкості, часи. На верхніх рівнях істотні глобальні причинні залежності, тенденції, сценарії, динаміка потоків, вплив зворотних зв'язків і навколишнього середовища, моделювання якої може бути виділено в окремому і дуже непросту задачу.

У складних системах склад елементів та типи зв'язків можуть суттєво змінюватися. Такі системи можуть зростати, старіти, вмирати, перебудовуватися та еволюціонувати.

## Основи теорії транспортних процесів і систем

14

Систему як «організовано працюючу цілісність» характеризують стан та особливості їїньої зміни (рис. 10).

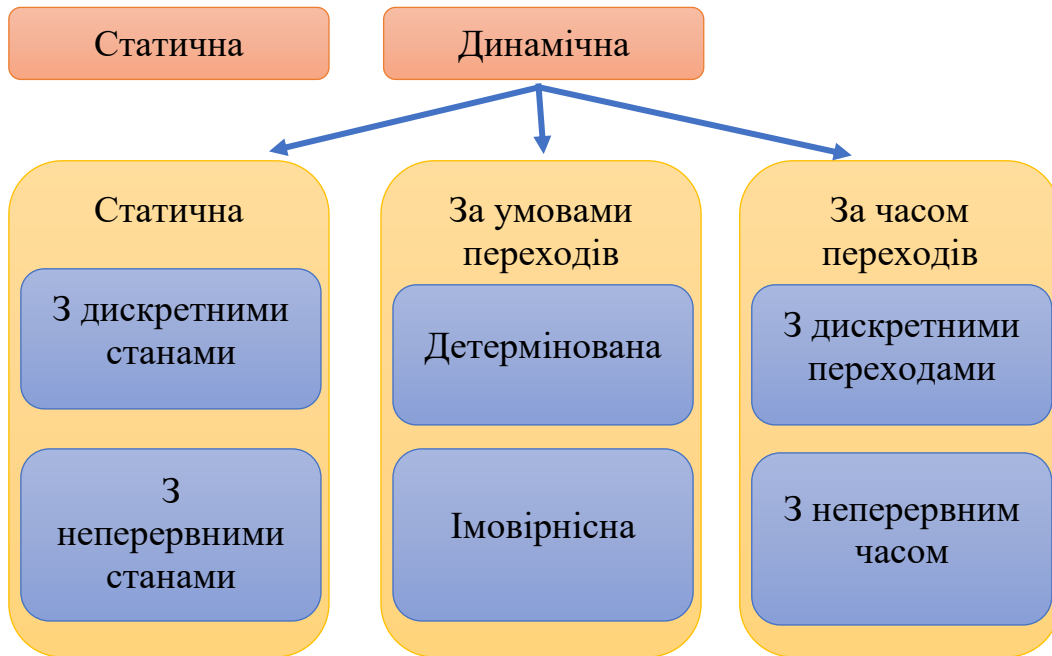


Рис. 10 Типи систем

При визначенні типу системи приймається рішення, у межах якої типової математичної схеми будуватиметься модель (табл. 1).

Таблиця. 1. Типові математичні схеми моделювання систем:

Стани \ Переходи	Детерміновані	Імовірнісні
	Безперервні	D -схеми
Дискретні	F -схеми	P -схеми

*D ( dynamic )* - моделі, виду  $dx / dt = f ( x )$ ;

*Q ( queuing )* - моделі систем масового обслуговування;

*F ( finite automata )* - Кінцеві автомати;

$P$  ( *probabilistic automata* ) - імовірнісні автомати.

Задля реалізації відповідної математичної схеми можливе застосування двох методів.

1. *Аналітичне моделювання* передбачає використання систем алгебраїчних, диференціальних, інтегральних рівнянь, що пов'язують вихідні змінні із вхідними. Рівняння доповнюються системою обмежень.

Аналітичне рішення можна знайти, якщо параметрів небагато і система має лінійну поведінку.

Головною перешкодою в реалізації цього методу може бути повна або часткова відсутність «формул» процесів.

Найдоступнішим інструментом аналітичного моделювання є Excel. Можливості цього середовища для створення моделей забезпечуються наявністю інструментів аналізу, великої кількості математичних функцій, реалізацією чисельних методів, вбудованою підтримкою Basic for Applications. Імітаційний потенціал Excel обмежений, і побудова моделей динамічних систем становить певні труднощі. Використання програмних можливостей цього пакета дозволяє частково долати цю проблему.

2. *Імітаційне моделювання*. Тут математична модель відтворює алгоритм («логіку») функціонування досліджуваної системи в часі при різних поєднаннях значень параметрів системи та зовнішнього середовища.

*Імітаційне моделювання* – це побудова комп'ютерних моделей та проведення експериментів з ними.

Імітаційний підхід застосовують, коли параметрів багато, залежності не лінійні, система має якісно різні стани (безперервні процеси перериваються дискретними переходами), траєкторію в часі (об'єкт еволюціонує), має імовірнісну поведінку та зворотні зв'язки. Імітаційний підхід незамінний, коли потрібно супроводити модель анімаційної презентацією. При створенні

віртуальних тренажерів, моделей руху транспорту та пішоходів це може стати головним завданням моделювання.

Поєднання імітаційного та аналітичного методів можливе в рамках однієї *комбінованої* моделі та здатне реалізувати практично будь-які завдання.

### *Завдання моделювання систем*

До будь – якого об'єкта як предмета моделювання можна додати два завдання «верхнього рівня» . По-перше, потрібно визначити, «з чого він зроблений» . Ця процедура реалізується за допомогою системного аналізу. Будь-який об'єкт спочатку розглядається як «чорний ящик», що володіє входами (введеннями) та виходами (висновками).

Потім виробляється *декомпозиція* системи: перебувають усі її елементи чи підсистеми, зв'язки з-поміж них, що належать їм вхідні і що виходять потоки тощо. Процес завершується побудовою структурної моделі. Відповідно до вимоги ізоморфізму у структурній моделі домагаються *якісної* адекватності оригіналу.

Друге завдання – з'ясування, «як об'єкт працює» – може бути реалізована в кілька етапів:

- 1) будується функціональна, *кількісно* адекватна оригіналу модель, яка відбиває алгоритм роботи системи;
- 2) створюється імітаційна модель, вид якої визначається особливостями функціонування системи та завданнями візуалізації;
- 3) плануються та проводяться модельні експерименти;
- 4) залежно від результатів експериментів приймаються рішення щодо внесення змін до моделі, пошуку додаткової інформації про систему, проведення нових випробувань;
- 5) робляться висновки та рекомендації.

*Напрями та інструменти імітаційного моделювання.*



Незважаючи на широту поняття «імітаційне моделювання», існує певна спеціалізація його завдань. У зв'язку з цим виділяють такі напрями цього методу та найбільш відповідне їм програмне забезпечення:

- моделювання динамічних систем ( MATLAB, Vis-Sim, Lab View, Easy 5);
- дискретно-подієве моделювання (GPSS, SYMULA, Arena, AutoMod, Enterprise Dynamics, FlexSim);
- агентне моделювання (Net Logo, Swarm, Repast, ASCAPE);
- системна динаміка (VenSim, PowerSim, iSink).

Перелічені програмні пакети мають як безперечні перевагами, так і мають свої недоліки, до яких належать – вузька спрямованість, нелокалізований інтерфейс, прив'язка моделей до середовища розробки (не автономність) та висока вартість (MATLAB). Наслідок цього – формування непередставницьких угруповань розробників.

Інструмент імітаційного моделювання AnyLogic має низку переваг, головне з яких – можливість реалізації всіх напрямків імітаційного моделювання в одній моделі.

#### 4. Принципова різниця аналітичних та імітаційних моделей, як інструментів оптимізації транспортних процесів

Моделі можна застосовувати в якості:

- інструменту осмислення дійсності;
- засобу спілкування між фахівцями;
- засобу навчання, тренування, опанування нових знань;
- інструменту прогнозування;
- інструменту пошуку раціональних рішень через постановку експериментів.

## Основи теорії транспортних процесів і систем

18

Одним з найбільш важливих застосувань моделей в практичному аспекті є прогнозування поведінки реальних об'єктів через моделювання їх процесів і постановки експериментів в ситуаціях, коли експеримент на реальних об'єктах є практично неможливим або економічно недоцільним (наприклад інфраструктурні об'єкти залізниці). При експериментуванні з моделлю є можливість безпечного вивчення та отримання більшого обсягу корисної інформації, ніж могли би дізнатися, маніпулюючи з реальною системою. Наприклад причинно-наслідкові зав'язки між існуючими параметрами системи та моделями поведінки окремих елементів між собою.

Математичне моделювання зайняло поважну і важливу частину будь якого процесу прийняття раціональних рішень. Але що ми знаємо про процес розрахунків, аналіз та представлення результатів. Першим, що згадується при застосуванні інструментів прогнозування, елементарних розрахунків та презентації результатів є пакет електронних таблиць MS Excel – один із самих розповсюджених та інтуїтивно зрозумілих у використанні *табличний процесор* із скриптами (макросами), інструментами аналізу (пошук рішення, пакет аналізу) і засобами візуалізації результатів (графіків):

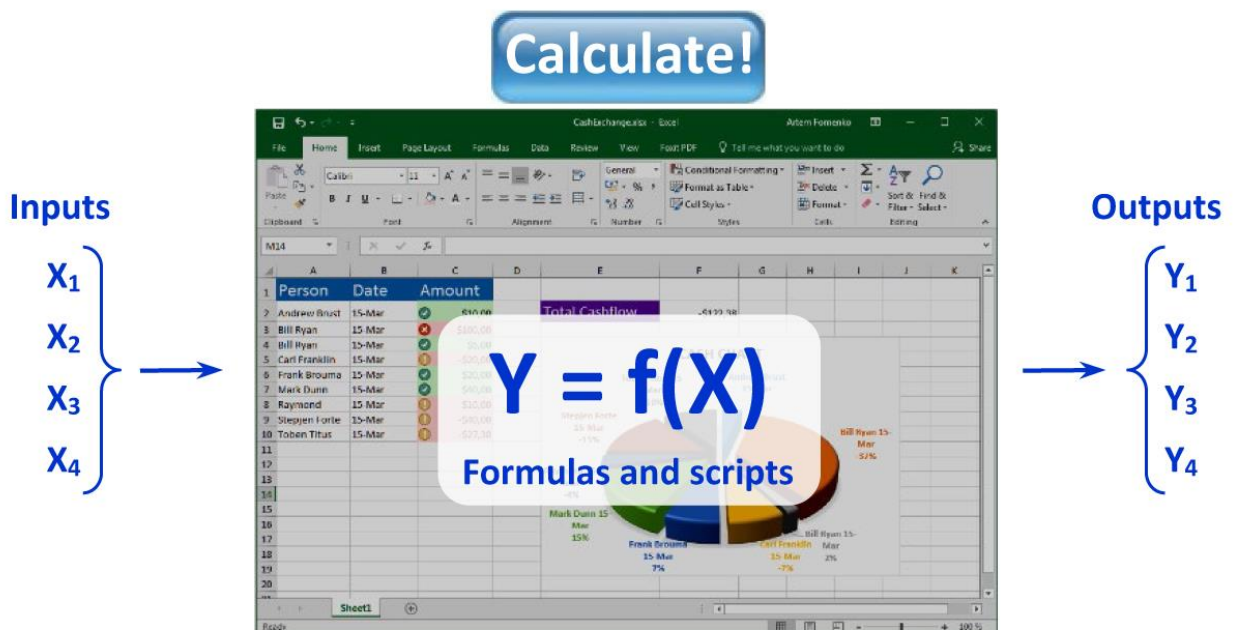


Рисунок 11 - Табличний процесор MS Excel як інструмент аналітичного моделювання

Дійсно, це дуже зручно: вводяться вихідні дані, зазначаються алгоритми (формули, залежності) співвідношення, та отримуються результати. Самі результати в достатньо зручній формі представляються у вигляді графіків та діаграм. Тому такий підхід набув популярності у багатьох сферах, починаючи від бухгалтерської звітності та фінансів, закінчуючи пошуком оптимальних рішень постачання та виробництва.

Однак головною умовою можливого використання даного підходу є те, що користувач (дослідник, фахівець) повинен знати алгоритми, правила та конкретні вирази функціональних залежностей між вихідними даними та результатом, для того щоб елементарно прорахувати, знайти відповідь на поставлене питання. Це може здаватись простим та зрозумілим, але це й є сутністю та, мабуть, головним недоліком аналітичного моделювання, оскільки далеко не завжди вдається знайти «ту саму формулу».

Наприклад при оцінці та дослідженні складних процесів та систем, особливо з елементами імовірнісної поведінки, достатньо складно врахувати всі вихідні параметри, алгоритми поведінки та порядок взаємодії між собою всіх елементів в структурі всієї системи (рис. 12). Простіше кажучи, знайти таку формулу, або систему рівнянь чи інший спосіб математичної формалізації, який достатньо точно описував би процес функціонування всієї залізничної станції одразу є просто не можливим. Тому такі складні та великі процеси прийнято розділяти на підсистеми та елементи і досліджувати їх окремо, роблячи припущення, що сума результатів оцінки окремих елементів приблизно буде таким, як оцінка всієї системи одразу.

Хіба що не єдиним інструментом аналітичної оцінки імовірнісних процесів є Теорія масового обслуговування (*Queueing theory*). Однак даний підхід достатньо обмежений при оцінці багатofакторних процесів, і у більшості підходить тільки для моделювання найпростіших процесів. Однак:

## Основи теорії транспортних процесів і систем

20

- далеко не кожен процес є найпростішим, і може бути описаний експонентним розподілом. Безліч процесів описується тільки розподілом Ерланга (Гамма-розподілом), Вейбула, Нормальним та ін. ;
- як регулювати і враховувати місця в черзі, в кількості 10, 100,  $10^9$ ?
- як вивчати багатofазні процеси обслуговування?
- як комплексно вивчити взаємодію систем масового обслуговування (СМО). Одна невелика залізнична станція включає в себе 5 - 10 СМО, великий контейнерний термінал – сотні СМО. Один транспортний вузол – тисячі і навіть мільйони різних за характером поведінки СМО?

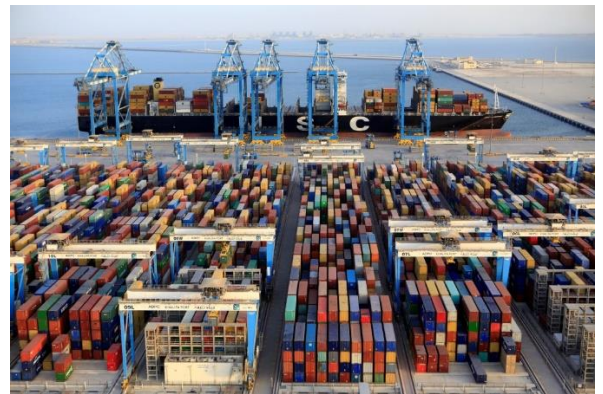


Рисунок 12 Приклад складних інфраструктурних об'єктів із імовірнісними процесами

Враховуючи вищесказане можна резюмувати, що головними перевагами аналітичних моделей є їх простота та універсальність при оцінці простих процесів та явищ. Головними недоліками є необхідність у формалізації (математичному описі) процесів та функціональна обмеженість у дослідженні складних та багатoeлементних процесів та систем, особливо тих, які потребують системного підходу та включають у себе імовірнісні процеси.

Імітаційні моделі відповідно до своєї назви «імітують» або «симулюють» певний процес або явище. Тому для дослідження такою методологією не обов'язкова, і навіть не потрібна, формалізація процесу. На

## Основи теорії транспортних процесів і систем

21

відміну від аналітичних моделей, застосування імітації при дослідженні різного типу проблематики передбачає інший порядок:

1. Створюється комп'ютерна модель (програма, додаток) яка імітує реальний процес із достатнім рівнем абстракції.

2. Змінюючи параметри моделі та алгоритм взаємодії її елементів робляться висновки про зміну характеру поведінки та рівень впливу причинно-наслідкових зав'язків на кінцевий стан системи, тобто результат моделювання.

3. Кінцевий результат відповідає всім ознакам системності, оскільки визначає стан одразу всієї системи.

Імітаційна модель - це завжди модель, яка «виконується»: ви можете її запустити, і вона побудує вам траєкторію змін стану системи з часом (рис. 13):

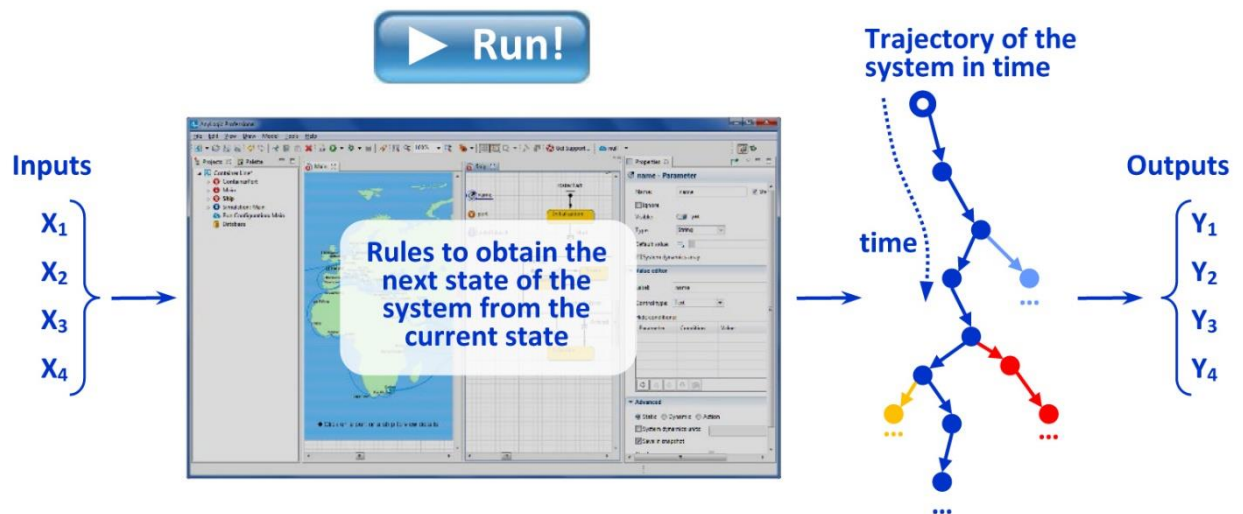


Рисунок 13 Структурна схема імітаційного моделювання

Імітаційна модель – симулює, а не описує процес. У цьому принципова різниця. При симуляції необхідний результат знаходиться через спостереження, а не розраховується, як при аналітичному моделюванні:

- цільова функція імітаційної моделі (у неявному виразі):

$$f(\text{Exp}(\lambda_{\text{доб.}}), m_{\text{зб.лок.}}, m_{\text{зб.скл.}}, m_{\text{ваг.}}, S_i : S_N) \rightarrow \min; \quad (2)$$

- цільова функція аналітичної моделі (у явному виразі):

$$45m_{\text{зб.лок.}} + 12m_{\text{зб.скл.}} - 17m_{\text{ваг.}}^2 + 5365 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Отже принциповими відомостями застосування імітаційного та аналітичного моделювання є різний порядок застосування та розв'язання науково-прикладних завдань (таблиця 2).

Таблиця 2 – Особливість використання підходів аналітичного та імітаційного моделювання.

<b>Критерій порівняння</b>	<b>Аналітичні моделі</b>	<b>Імітаційні моделі</b>
<b>Форма реалізації</b>	через розрахунок*	через спостереження*
<b>Види моделей по відношенню до часу</b>	динамічне (обмежене) та статичне	динамічні (максимально-повне)
<b>Форма запису моделі</b>	рівняння або система рівнянь об'єкта дослідження у явному виразі*	алгоритм (процедура) об'єкту, що досліджується. Цільова функція в неявному виразі*
<b>Формалізація і побудова моделі</b>	часто важкі	більш легкі
<b>Спосіб вирішення моделі</b>	алгоритм оптимізації*	евристичний або експериментальний



		аналіз за допомогою комп'ютера*
<b>Кількість випробувань для вирішення</b>	одне	багато
<b>рішення</b>	точні значення*	імовірнісні характеристики*
<b>Знаходження оптимального рішення в разі побудови моделі</b>	гарантовано*	не гарантоване*
<b>Рішення складних систем</b>	важко*	можливо*
<b>Застосування на практиці</b>	обмежена*	не обмежена* (менш обмежена)
<b>Ступінь близькості моделі до досліджуваного об'єкта (тобто ступінь адекватності)</b>	сильно спрощена*	максимально наближена до досліджуваного об'єкта*
<b>Клас досліджуваних об'єктів</b>	звужений	розширений

\* принципові відмінності

### План теми

## 5. Програмне середовище розробки імітаційних моделей AnyLogic

AnyLogic — програмне забезпечення для імітаційного моделювання бізнес-процесів, розроблене компанією The AnyLogic Company (США). Це інструмент нового покоління, що розроблений на основі сучасних концепцій в області інформаційних технологій та результатів досліджень в галузі теорії гібридних систем та об'єктно-орієнтованого моделювання. Побудована на їх основі інструментальна система не обмежує користувача єдиною парадигмою

моделювання, що характерна для інших схожих програмних продуктів. В AnyLogic розробник може успішно використовувати різні рівні абстракції та різноманітні стилі і концепції; змішувати їх при створенні однієї і тієї ж моделі.

Остання версія AnyLogic 9 написана мовою програмування Java в популярному середовищі розробки Eclipse і є крос-платформним програмним забезпеченням, що працює як під управлінням операційної системи Windows, так і під Mac OS і Linux.



Рисунок 14 Емблеми AnyLogic, Java(Oracle) та Eclipse

Інтеграція Java-компілятора в AnyLogic забезпечує більш широкі можливості при створенні моделей, а також створення Java-апплетів, які можуть бути відкриті будь-яким браузером. Ці апплети дозволяють легко розміщувати моделі AnyLogic на веб-сайтах.

Програмний продукт AnyLogic побудовано на основі об'єктно-орієнтованої концепції. Об'єктивно-орієнтований підхід до представлення складних систем є найкращим на сьогоднішній день методом управління складністю інформації, ця концепція дозволяє просто і природним чином організувати і представити структуру складної системи. Таким чином, ідеї та методи, спрямовані на управління складністю, розроблені в останні десятиліття в області створення програмних систем, дозволяють розробникам моделей в середовищі AnyLogic організувати мислення, структурувати розробку і, в кінцевому рахунку, спростити і прискорити створення моделей.



Об'єктно-орієнтовне, на відміну від функціонального, програмування дозволяє створювати складні програмні продукти із розгалуженою архітектурою, використовуючи набагато менші ресурси. Сама об'єктно-орієнтовна парадигма передбачає створення класів, відповідно до яких при реалізації програми створюються об'єкти класів. Класи – це шаблони мікропрограм, що можуть містити як різні типи даних, так функції та процедури їх обробки. У процесі розробки складних програмних продуктів, до яких можна віднести імітаційні моделі технологічних процесів залізничних транспортних систем, при створенні однотипних блоків немає потреби розробляти (як при функціональному програмуванні) кожний блок окремо. Створюється необхідний клас, а при реалізації програми у віртуальній пам'яті створюються екземпляри класу стільки, скільки треба за установчими параметрами.

Приклад можна навести імітацію надходження заявки у залізничну транспортну систему, що за фізичним змістом відповідатиме, наприклад, прибуттю поїздів у обробку. Тільки один раз створюється клас «поїзд», який наділяється необхідними, загальними характеристиками всіх поїздів: номер, вага, категорія, час прибуття, час початку технічного огляду, час закінчення технічного огляду, час причеплення поїзного локомотива, час відправлення та інші необхідні параметри. При реалізації програми (імітаційної моделі) при генерації заявки буде створюватись екземпляр класу, який вже наділений вихідними параметрами, і ці параметри (за необхідності) можуть змінюватися у процесі моделювання. Наприклад, номер поїзда присвоюється при генерації заявки, а моменти надходження заявки у відповідні блоки присвоюються під час моделювання.

Іншою базовою концепцією AnyLogic є представлення моделі як набору взаємодіючих, паралельно функціонуючих активностей. Такий підхід до моделювання інтуїтивно дуже зрозумілий і природний в багатьох додатках, оскільки системи реального життя складаються з сукупності активностей,

взаємодіючих з іншими об'єктами. Активний об'єкт AnyLogic – це об'єкт з власним функціонуванням, взаємодіючих з оточенням. Він може включати в себе будь-яку кількість екземплярів інших активних об'єктів. Активні об'єкти можуть породжуватися і зникати відповідно до законів функціонування системи. Так можуть моделюватися соціальні групи, холдинги компаній, транспортні системи і т. д.

Система AnyLogic – це комплексний інструмент, що охоплює основні напрямки моделювання: дискретні-події, системну динаміку, агентне та ін. (рис. 15) Крім того є можливість ефективного об'єднання всіх типів моделювання у одній моделі, що значно збільшує можливість моделювання. Кожний з підходів має свої переваги та сфери використання (рис. 2.6), що буде розглянуто у інших розділах цього рукопису.

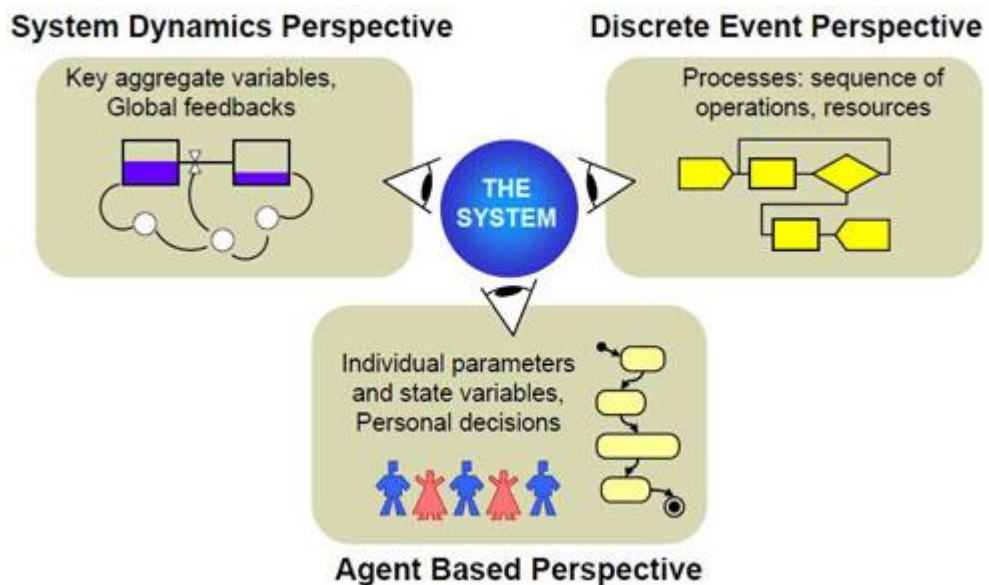


Рисунок 15 Графічна інтерпретація трьох принципів імітаційного моделювання

На сьогодні за допомогою AnyLogic стало можливим розробляти моделі в наступних областях:

- виробництво;

## Основи теорії транспортних процесів і систем

27

- логістика та ланцюги поставок;
- функціонування транспортних процесів та систем;
- оцінка та управління ризиками;
- ринок і конкуренція;
- бізнес-процеси та сфери обслуговування;
- охорона здоров'я та фармацевтика;
- управління активами та проектами;
- телекомунікації та інформаційні системи;
- соціальні та екологічні системи;
- пішохідна динаміка;
- оборона, безпека, надійність.

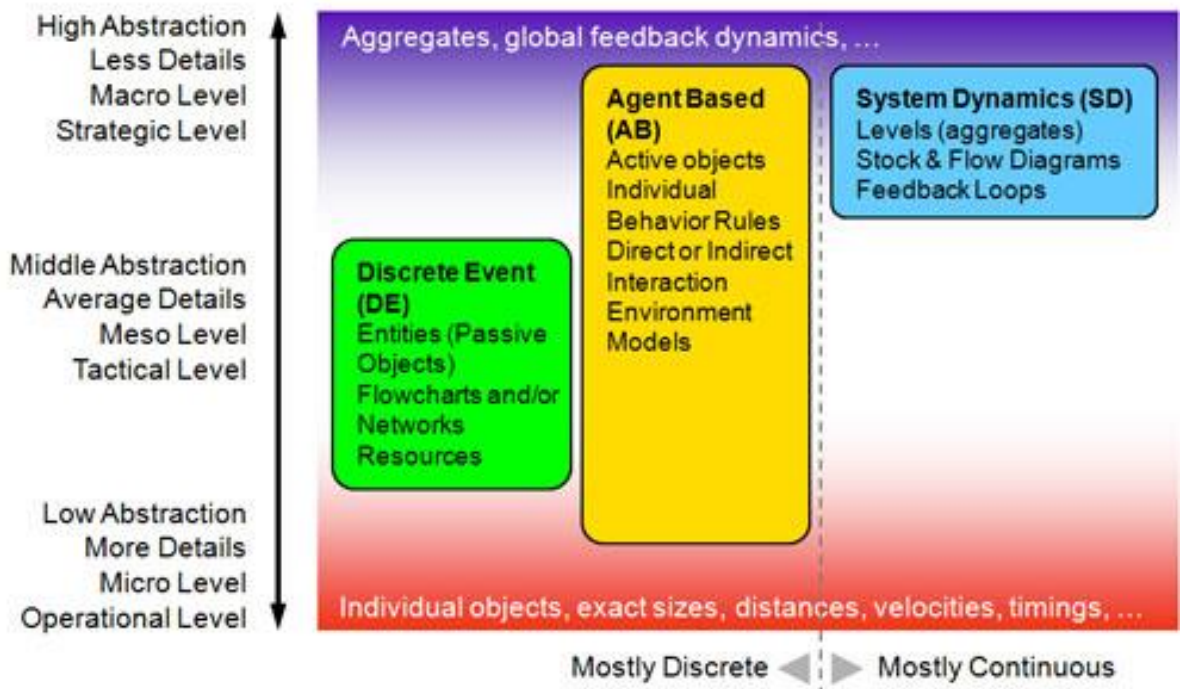


Рисунок 16 Порівняльна діаграма різних рівнів абстракції для основних принципів імітаційного моделювання.

План теми