

УДК 62.50:658.21

Т. М. Боровська, к. т. н., доц.

СТВОРЕННЯ МЕТАМОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ МЕТОДУ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНО- РЕДУКЦІЙНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

Запропоновано та обґрунтовано концепції структури моделей розподілених систем на базі структурної, функціональної і редукційної декомпозицій моделі складної системи. Розроблено моделі і методи, що реалізують запропоновані концепції.

Постановка проблеми

В умовах глобалізації головним інструментом прогнозування і планування є робочі (реалізовані в програмному середовищі) математичні моделі систем класу « N виробників, M продуктів, K споживачів» ($N \times M \times K$ -систем). Побудова математичних моделей для складних, відкритих, таких що розвиваються систем, вимагає адекватної концепції декомпозиції. Проблема міждисциплінарна, тобто «нічийна» — маємо справу з *розподіленими системами*, функціонуючими за *монолітними, нероз'ємними соціо-техніко-економічними* механізмами. Аналоги і прототиби роботи: багатокрокова декомпозиція процесу прийняття рішень (Р. Беллман [1], Л. Понтрягін [5]); багаторівневі ієрархічні декомпозиції — страти, шари, ешелони (М. Месарович [2, 3]), багаторівнева декомпозиція процесу розвитку, анатомічний та фізіологічний принципи декомпозиції (М. Пешель [4]), мерномія, таксономія, корозбиття (Ю. Шрейдер, Ю. Шаров [7]).

Постановка задачі

Сьогодні потрібні методи і технології, що дозволяють створювати нові моделі для нових задач за 2—3 місяці, а не за 20-30 років. Мета роботи — розробити не стільки методологію і методи, скільки програмні модулі, щоб на прикладі показати можливість оперативного створення робочих моделей $M \times N \times K$ — систем на базі *метамоделі $N \times M \times K$ -систем* = (декомпозиційної структури моделей + моделі побудови і розвитку такої системи моделей).

Розподілені системи К-класу. Аналіз інформації відносно процесів розвитку певних класів виробів, виробництв, систем управління підприємствами дозволяє виділити окремий клас розподілених систем різної природи — обчислювальних, соціо-техніко—економічних, інформаційних, які можна описати єдиною математичною моделлю « N елементів M задач». Поведінка елемента описується узагальненою імовірнісною моделлю зростання з обмеженням та імовірнісною моделлю локального управління розподілом ресурсу елемента між «виробництвом» окремих «продуктів».

Розподілені системи Д-класу. Зміна концепції оптимізації обумовлює концепції декомпозиції. Аналіз практики проектування і реальних структур великих систем дозволяє диференціювати розбиття «ціле — частина» мінімум на три класи [8]. *Функціональна декомпозиція* — розбиття математичної моделі (ММ) на субмоделі, кожна з яких відображує якусь часткову функцію повної ММ. *Редукційна декомпозиція* — розбиття ММ системи на субмоделі, що належать до одного структурного класу апроксимаційних моделей. Кожна з субмоделей відображає повну ММ системи, але з різною точністю. *Структурна декомпозиція* — розбиття ММ системи на субмоделі, що належать до різних структурних класів і є еквівалентними відносно критеріїв точності відображення реального об'єкта. Кожна структурна модель відображує усі функції повної ММ.

Синтез декомпозиційної структури для систем К-класу і Д-класу. Об'єднаємо два еволюційних процеси розвитку реальних систем та їх моделей. На рис. 1 подано декомпозиційну структуру «Д-системи + К-системи». Згідно цій схемі кожний об'єкт може розглядатись і як система, що може складатись з структурних, функціональних і редукційних елементів, і як перетин систем, до складу яких може входити і даний елемент. Природна інтерпретація схеми — складання семантично і прагматично коректних текстів зі слів певного словника. Використання певного

елемента в системах характеризується — «темою» — цільовим призначенням системи, «синонімом» — можливим заміником даного елемента в даній темі (контексті) і «доповненням» — необхідними іншим елементам при використанні в даній «темі» (контексті).

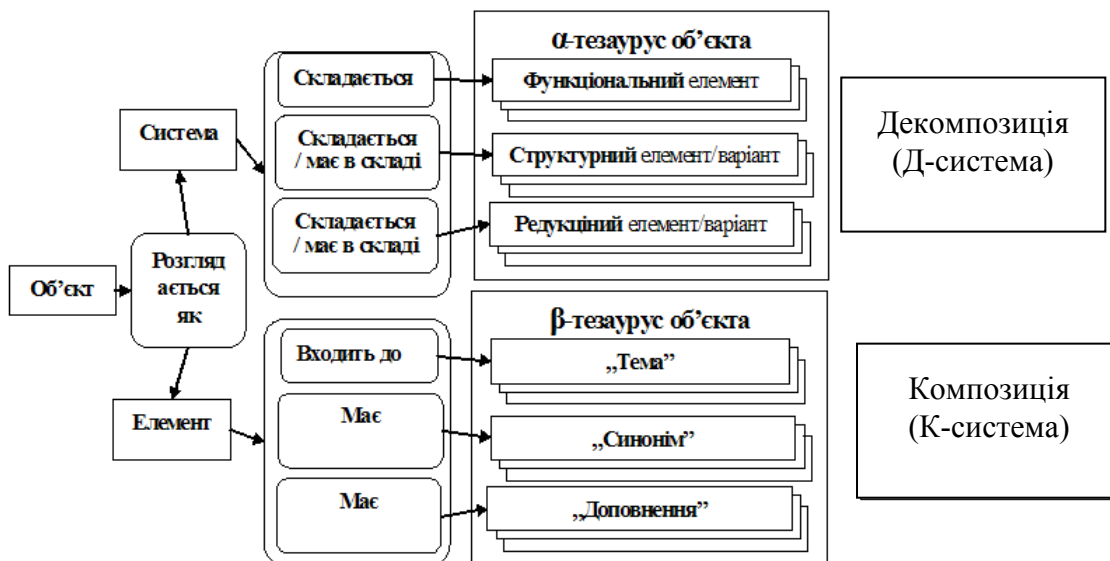


Рис. 1. Схема процесів декомпозиції/композиції

Аналіз проблеми

Згідно постулатам проблемології вирішення однієї проблеми породжує декілька нових, і при послідовному розв'язанні проблеми розмножуються, якщо не виділити центральну проблему. Очевидна проблема в умовах глобалізації бізнесу і прискорення темпів змін на всіх рівнях — *розробка засобів активного прогнозування розвитку систем різних рівнів* — від окремих підприємств і локальних ринків до глобальної економіки.

Активне прогнозування — це розробка таких моделей, що не стільки відтворюють реальність, скільки *відтворюють дійсні механізми*, що визначають поведінку соціо-техніко-економічних систем. Такі моделі, на відміну від моделей на базі чистої статистики або «штучних нейронних мереж», дозволяють експериментувати над віртуальною реальністю для пошуку катастрофічних режимів і режимів, що забезпечують виживання і сталий розвиток системи. Про актуальність такого підходу свідчить присудження Нобелівської премії за роботу «Теорія Конструювання Механізмів» (розподілу ресурсів) — Rawning bases of theory of optimum mechanisms.

Проблема прогнозування розвитку розподілених соціо-техніко-економічних систем породжує конгломерат взаємопов'язаних проблем. Стисло розглянемо ці проблеми і вибрані рішення:

- проблема раціональних технологій конструювання математичних моделей;
- проблема раціональних структур моделей складних систем;
- проблема раціональних технологій проведення досліджень на моделях.

Раціональна інформаційна технологія — послідовність правил, операцій, що дозволяє *при кінцевих витратах* ресурсів і часу отримати задовільну модель системи.

Раціональна структура моделі — така декомпозиція математичної моделі, що дозволяє подати складну систему множиною моделей елементів одного параметричного класу, модель елемента розбити в функціональні моделі, що відображують природні соціо-техніко-економічні механізми і так *при кінцевих витратах* часу і ресурсів робити нові моделі для нових задач за рахунок модифікації базової моделі.

Раціональна технологія проведення досліджень на моделях — така декомпозиція в спрощені, тестові, базові моделі з відповідними інтерфейсами, що дозволяють *при кінцевих витратах* часу і ресурсів виконувати відлагодження і верифікацію нових моделей для нових задач.

Вирішення цих проблем дозволяє задовольнити вимогам практики в умовах високих технологій та інтенсивної глобальної конкуренції:

- управління повинно наблизитись до оптимального в даних умовах;
- управління повинно базуватись на задовільних прогнозах розвитку класу «що буде якщо».

Сьогодні задовільні прогнози класу «що буде якщо» для розвитку розподілених систем можуть бути отримані тільки на комп'ютерних моделях, що базуються на природних механізмах, подібних законам фізики і біології, та мають раціональну декомпозиційну структуру.

В цій статті розглядаються тільки *практичні результати* досліджень проведених на розроблених моделях.

Постановка задачі розробки моделі розподіленої системи

Ставиться задача розробки модульної відкритої для розширення, уточнення і спеціалізації моделі « N виробників, M видів продуктів, K споживачів». Кінцеве призначення моделі — обґрунтовані, коректні якісно і правдоподібні кількісно відповіді на породжені глобалізацією питання «що буде якщо» та «що робити якщо», наприклад:

- активне прогнозування стану сільгоспвиробників і ринків певного регіону;
- активне прогнозування стану виробників і ринків одягу і взуття в умовах заповнення європейських ринків китайською продукцією;
- аналіз впливу зміни доходів населення на обсяги у структуру виробництва;
- аналіз і прогнозування мережевих інформаційно-обчислювальних систем і послуг.

Акцент на активне прогнозування веде до трансформації стандартного «*що буде якщо*» аналізу в «*що робити якщо*» аналіз. Для цього потрібні повністю відкриті для модифікації модулі «об'єкт управління», «управління» та «збурення». Наприклад, споживач високотехнологічної продукції може бути «об'єктом управління» з такими «каналами управління»: ціна, інформування від виробника та «з уст в уста», бонуси за «вірність», темпи споживання та ін. Одночасно споживач управляє структурою і обсягами випуску продуктів, а каналами управління є: обсяг і структура попиту, спілкування з виробником через «форуми споживачів», «спільні лабораторії».

Відомі класичні моделі світової економіки, галузі, міста, підприємства складаються з сотень рівнянь: брукінгська модель економіки — 200, моделі Форрестера: модель міста — 60—150, модель фірми — 40—70 рівнянь. Ці моделі — агреговані, регресійні, тобто побудовані на базі статистичних даних і простіших «механізмів» техніки і економіки. Між відомими моделями фірми і макроекономічними моделями існує розрив — вони пов'язані через регресійні моделі, що не відображують гарантовано діючі механізми. На важливість проблеми «псевдорегресій» вказував Форрестер [6].

Очевидно, що застосування «надпотужних» інтелектуальних методів типу «штучні нейронні мережі» для аналізу статистичних даних гарантують отримання псевдорезультатів, якщо статистичні дані просто некоректні і неповні. Побудова моделей на базі класичних інструментів статистики теж безнадійна. На рис. 2. подано приклад моделювання системи « N виробників, M продуктів». На вибірці обсягом 10000 реалізацій процесу побудовані частотні розподіли темпів доходів системи «три виробника на ринку трьох продуктів» для трьох значень ефективності одного з елементів системи — виробників. Ці розподіли негаусівські, полімодальні і структурно нестійкі — такі, що катастрофічно змінюються при малих змінах параметрів системи.

Концепція побудови моделі системи « N виробників, M видів продуктів, K споживачів». Формалізоване математичне обґрунтування вибору концепції розглянуто в [3, 4, 7, 8]. Конструктивним обґрунтуванням концепції є побудова робочих моделей і обробка результатів моделювання. Подаємо складові концепції:

$K1$ — *орієнтація на якісні, а не кількісні критерії точності моделей*, тобто на відтворення діючих в системі механізмів, а не мінімізацію середньоквадратичних помилок;

$K2$ — *побудова моделей діючих в системі механізмів на базі лінгвістичних моделей*, що потенційно містять більше інформації, ніж статистичні; відлагоджена технологія:

«лінгвістична модель \Rightarrow графова модель \Rightarrow робоча модель»;

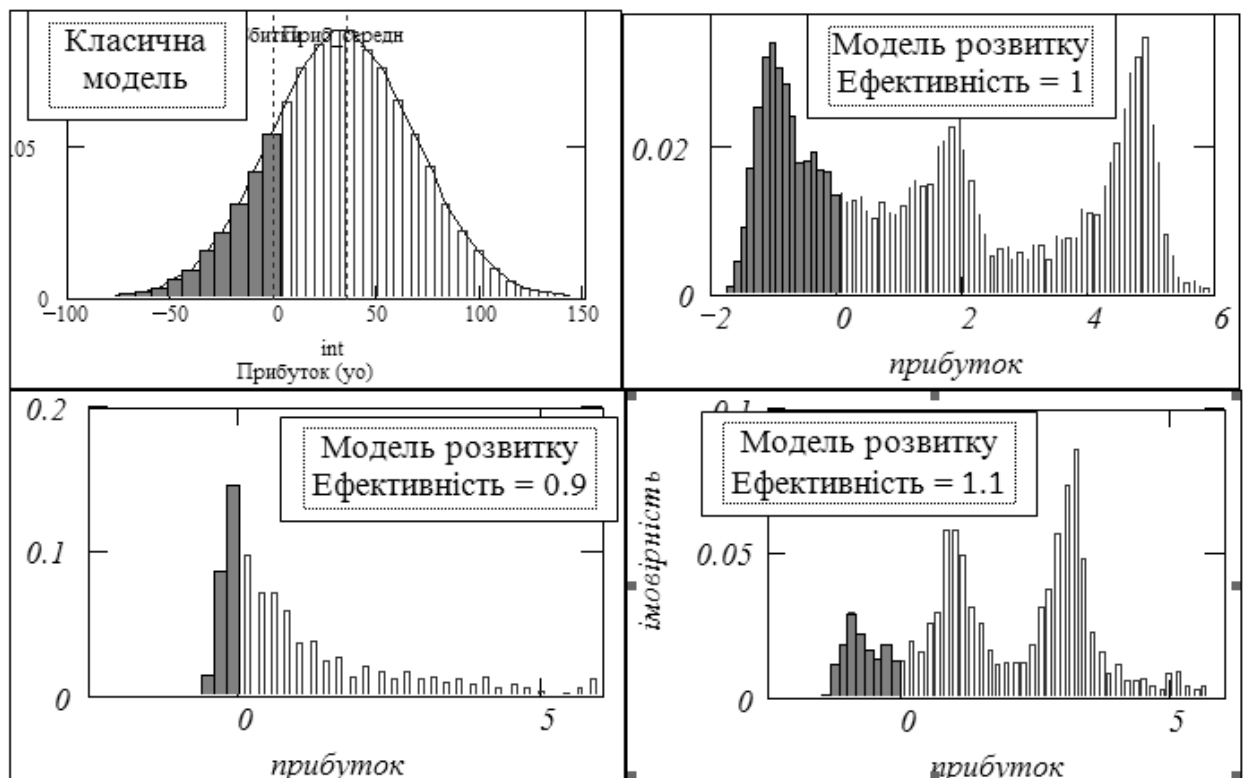


Рис. 2. Оцінка ризиків збитків за різними моделями розподілених систем

К3 — побудова упорядкованої системи моделей — від повністю агрегованої моделі до імітаційної моделі класу « $N \times M \times K$ », де моделюється функціонування кожного елемента;

К4 — застосування методів оптимального агрегування, частотні і рангові упорядкування елементів розподіленої системи;

К5 — згортка масивів, що описують стани елементів розподіленої системи в структури, орієнтовані на векторизацію обчислень, мінімізація кількості типів рівнянь;

К6 — орієнтація на активне прогнозування — пошук задовільних і безпечних варіантів розвитку системи.

Декомпозиція процесів управління і прийняття рішень. Розбиття монолітної виробничої системи в мережу окремих елементів (підприємств, фірм, корпорацій = бізнес-одиниць), породжує розбиття задачі управління.

У свій час популярною була концепція ієрархічних багаторівневих систем запропонована М. Месаровичем [2, 3], згідно якій глобальні задачі управління і прийняття рішень розбивалися в рівні прийняття рішень, що в ідеалі відповідали адміністративній ієрархії — ешелонам, і операційним об'єктам — стратам. Якщо застосувати це до загальнозрозумілої ієрархії — армії, то генерали повинні займатись стратегічно-генеральськими задачами великих ресурсних і часових масштабів, полковники — середніми, ... і, нарешті, сержанти і рядові — натискати кнопки, важелі, педалі. Сьогодні декомпозиції і координаційне управління по Месаровичу [2] виглядають досить тривіальними.

Виберемо таке «проектне рішення» — *кожний елемент може приймати тактичні і стратегічні рішення відносно усіх аспектів функціонування: виробництво, розвиток, інновації, дослідження та ін., але тільки для себе*, відносно своєї бізнес-одиниці; і, по можливості, не намагається ущасливити чи покарати інших. Чи природний такий підхід? Відповідь: такий підхід є біологічним та екологічним — в принципі одна клітина організму може вирости в цілий організм, може спеціалізуватись в певний орган — мозок чи серце.

Така модель інваріантна до розмірності системи, дозволяє не тільки параметрично, але і структурно налаштувати модель на конкретні застосування (нафтохімія, вища освіта, банківська справа). Головна перевага однорідної структури моделі — можливість векторизації обчислень, що в свою чергу дозволяє моделювати системи великої розмірності на масових комп'ютерах. На базі такого підходу були розроблені і випробувані моделі (N виробників, один продукт), (один вироб-

ник, M продуктів), (N виробників, M продуктів). Результати моделювання показали сумісність результатів і відповідність статистичним даним.

Декомпозиція моделі прийняття рішень виробником

Відомі сотні загальних моделей прийняття рішень, прийняття рішень з навчанням, з них можна вибрати десятки спеціалізованих моделей прийняття рішень виробником. Зробимо узагальнений модуль, такий, що за рахунок вибору значень певних параметрів, дозволяє відтворити різні ситуації прийняття рішень виробником. Змістовно, об'єктами прийняття рішень можуть бути: обсяги випуску певних продуктів; обсяги інвестицій у створення та згорання виробничих потужностей; рішення щодо купівлі чи продажу певних бізнес-одиниць; рішення щодо залучення зовнішніх ресурсів (кредитів, емісії акцій...); кадрові рішення. На рис. 3 подана розроблена схема прийняття рішень. З ряду причин зручно формалізувати всі ситуації прийняття рішень як задачі розподілу ресурсів. Прийемо, як перше наближення до «ідеальної моделі» таку *словесну модель прийняття рішень виробником*: на кожному кроці виробник послідовно ділить наявні ресурси:

- між «споживанням» і розвитком «окремих виробництв»;
- між пропорційним розподілом і «лотерейним».

Наведені вище словесні описи процесів прийняття рішень *виробником* будуть пустими словами, а схеми цих процесів — пустими схемами, якщо їх не довести до рівня програм. Розробка робочих моделей і програмних модулів для поставлених задач подана в [9, 10].

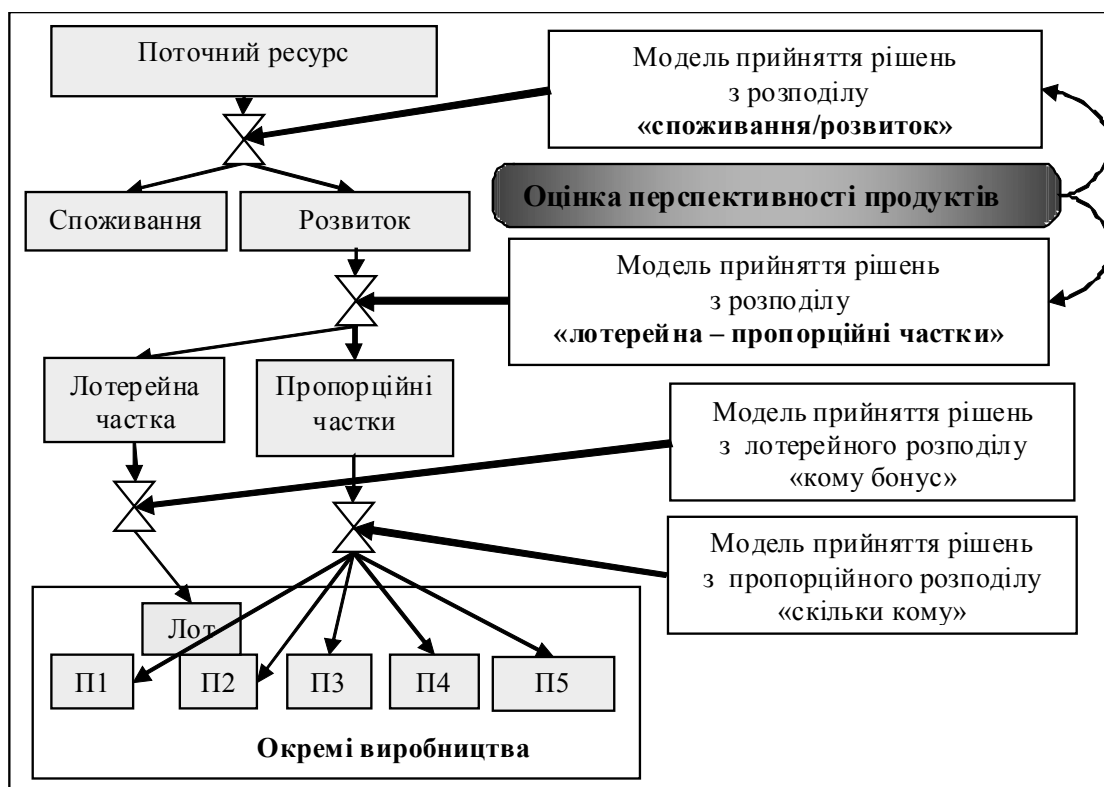


Рис. 3. Схема процесу прийняття рішень виробником

Результати розробки моделей і моделювання

Виконання розробки згідно наведеним вище пунктам дозволило отримати базову робочу модель системи. Далі подані вибрані частини розробки базової робочої моделі (повний обсяг документа — 90 сторінок). Побудована система моделей розподілених систем відкрита для розширення і уточнення. На рис. 4 подано схему, що відображає три кроки процесу розширення і уточнення

системи моделей. Ця система є одночасно зафіксованим в моделях процесом розвитку та реалізації метамоделі — процесу створення «кінцевої» робочої моделі; і «набором інструментів» для моделювання розподілених систем на різних рівнях деталізації і в різних «проекціях».

Декомпозиційна схема моделей розподіленої системи побудована на базі операції оптимального агрегування [9]:

- модель $(M \times N \times 1)$ є редукцією (спрощенням) моделі $(M \times N \times K)$;
- модель $(M \times 1 \times 1)$ є редукцією (спрощенням) моделі $(M \times N \times 1)$;
- модель $(1 \times N \times 1)$ є редукцією (спрощенням) моделі $(M \times N \times 1)$.

Розробка системи моделей починається з створення простіших моделей класів $(M \times 1 \times 1)$, $(1 \times N \times 1)$ (крок 1 на рис. 4), потім на базі цих моделей створюються моделі класів $(M \times N \times 1)$, $(1 \times N \times K)$ (крок 2 на рис. 4), наступний етап (крок 3 на рис. 4) — створення моделей класу $(M \times N \times K)$.

На схемах рис. 4 не відображена функціональна декомпозиція розбиття моделей систем на функціональні підсистеми: — моделі виробництва, розвитку виробництва, навчання (освоєння), попиту, пропозиції, споживання, інформаційного обміну між елементами та ін.

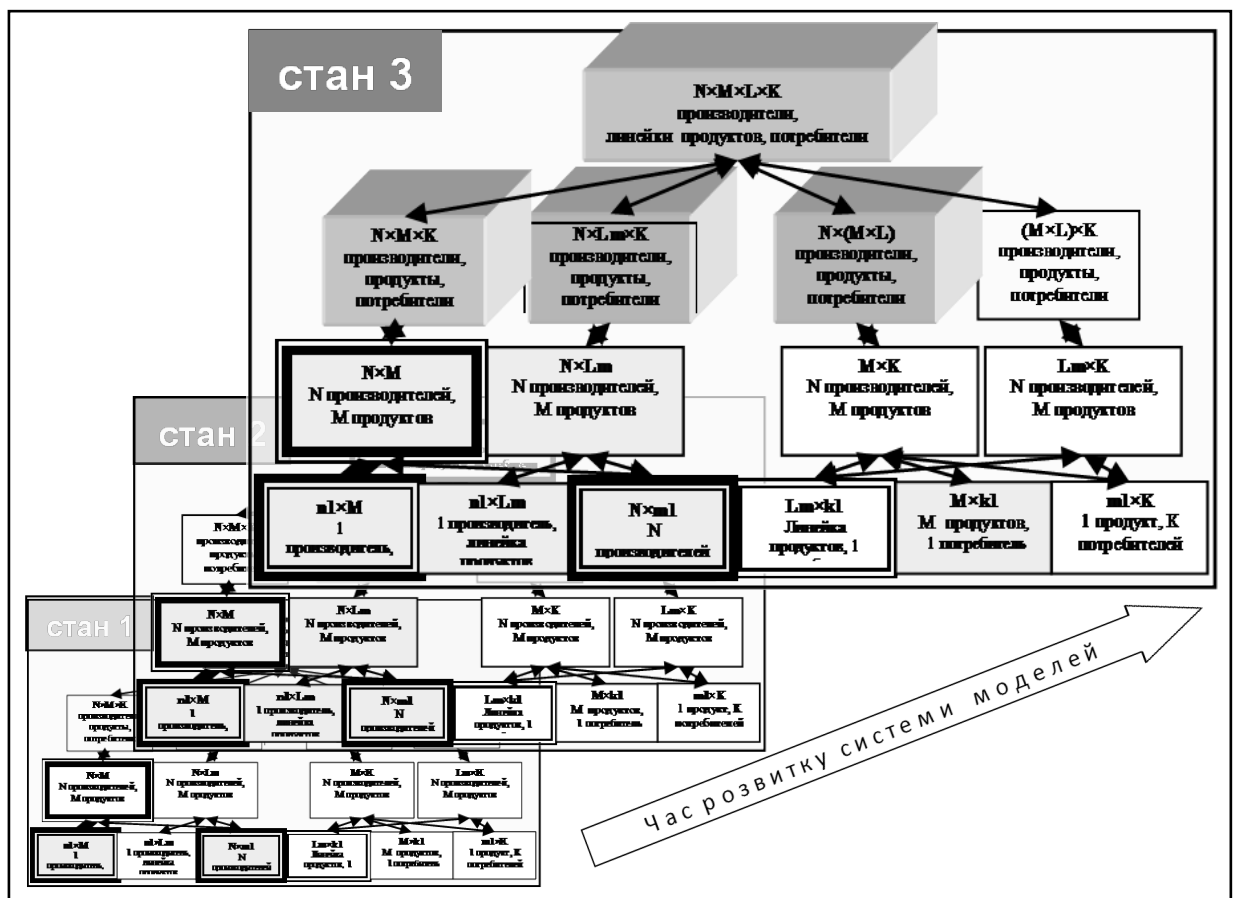


Рис. 4. Схема розвитку системи моделей розподіленої системи — метамодель

Програмні модулі, що реалізують названі функції є спільними ресурсами для конструювання моделей різних класів. При переході від агрегованих до дезагрегованих програмні модулі, що реалізують певні функції, модифікуються з використанням векторизації обчислень.

На рис. 5 подано результат розробки програму моделювання систем класу $(M \times N \times K)$. Програма складається з трьох десятків функціональних моделей і відповідних програмних модулів.

Подання результатів моделювання складної системи теж породжує свої вторинні проблеми вибору ефективної форми інтерфейсу. На рис. 6 подано результати моделювання (за програмою $M \times N \times K$ (вектор_продаж, темп_навчання)) — стан системи в певний момент часу.

$N \times M \times K (Vepr, Al) :=$

$$\begin{aligned}
 &Mf_1 \leftarrow Vepr_2 \\
 &Misci \leftarrow Vepr_1 \\
 &Nevy \leftarrow Vepr_3 \\
 &KolKup_1 \leftarrow KupKup \\
 &\text{for } k \in 1..Tm \\
 &\quad \left[\begin{array}{c} ByBy \leftarrow vp9 \left[\begin{array}{c} Mf_k \\ Misci \\ Nevy \end{array} \right], Al \\ \\ vubpok \leftarrow ByBy_1 \\ Mf_{k+1} \leftarrow ByBy_2 \\ KolKup^{(k)} \leftarrow ByBy_3 \\ "qq" \end{array} \right. \\
 &vux \leftarrow \left(\begin{array}{c} Mf \\ KolKup \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Розпаковуємо вектор параметрів:
 Mf_1 - стартове значення матриці оцінок продуктів споживачами
 $Misci$ - матриця істинних оцінок продуктів
 $Nevy$ - матриця невизначеностей оцінок продуктів споживачами.
 Цикл по кроках процесу розпаковуємо вихід підпрограми $vp9$:
 $vubpok$ - матриця "вибір споживачів";
 Mf_{k+1} - наступне значення матриці оцінок продуктів;
 $KolKup^{(k)}$ - вектор темпів продажі продуктів;
 Бачимо, що програма - просто цикл "по кроках моделювання", в якому виконується модуль $vp9$.

Тестуємо $N \times M \times K \left[\begin{array}{c} linpfrS \\ Mistc \\ Nvyz \end{array} \right], Al = \left(\begin{array}{c} \{51,1\} \\ \{50,50\} \end{array} \right)$
 $BYby := N \times M \times K \left[\begin{array}{c} linpfrS \\ Mistc \\ Nvyz \end{array} \right], Al$

Рис. 5. Текст і видача програми моделювання систем класу (M×N×K)

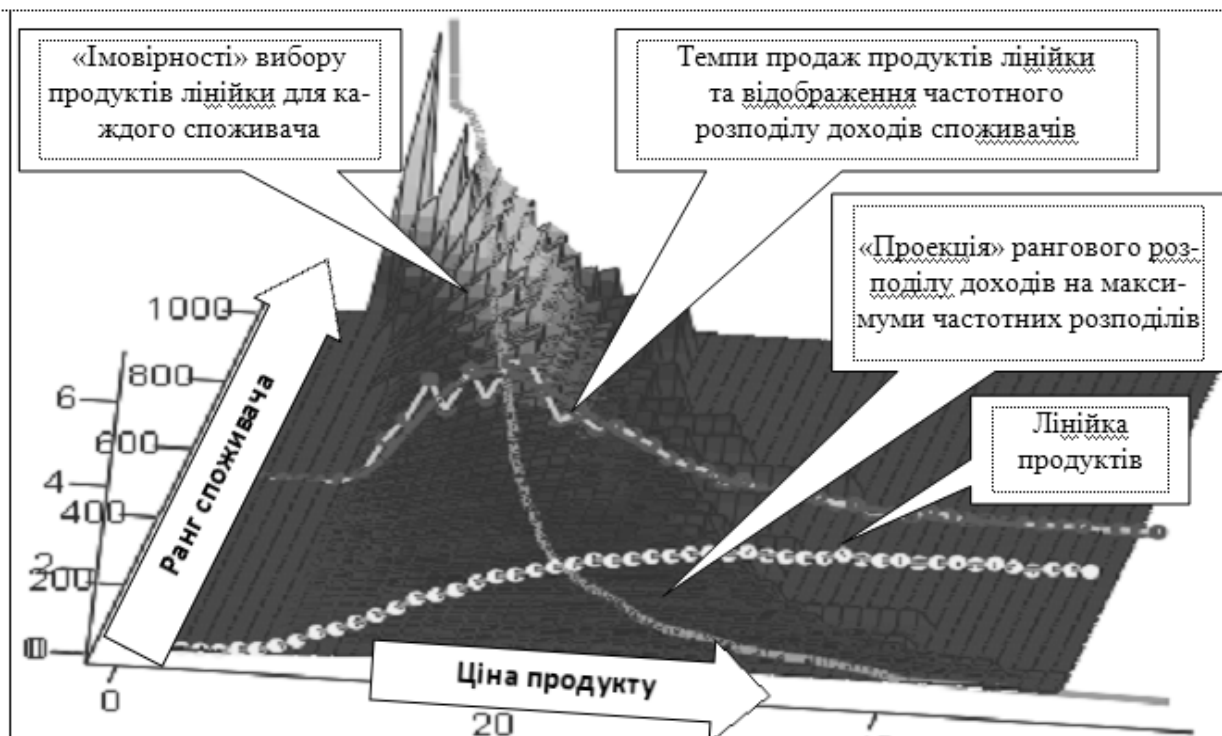


Рис. 6. Стан системи «1000 споживачів, 50 продуктів лінійки»

Інтерфейс орієнтований на виявлення зв'язків між станом і параметрами системи — характеристиками лінійки продуктів і розподілами споживачів за доходами, схильністю до споживання, насиченням попиту та ін. Розширення границь систем вимагає розширення і ускладнення інтерфейсів робочих моделей. На рис. 7, 8, 9 подано різні аспекти функціонування системи — частотні і рангові розподіли, перехідні процеси.

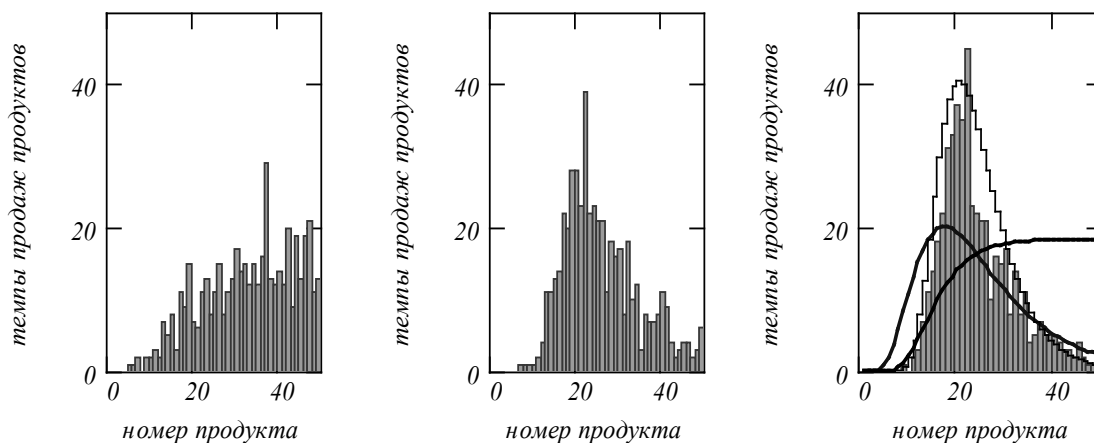


Рис. 7. Еволюція розподілу темпів продаж продуктів лінійки

На рис. 7 подано розподіли темпів продаж продуктів лінійки з урахуванням навчання споживачів для трьох послідовних моментів часу. На останньому «кадрі» на розподіл накладені «причини» — розподіл доходів споживачів та нелінійна регресія для лінійки продуктів, а також теоретичний розподіл отриманий методами ідентифікації для даного емпіричного розподілу.

На рис. 8. Подано перехідні процеси перерозподілу темпів продаж продуктів лінійки для випадку випадкового вибору споживачів, що не мають повної інформації про цінність продуктів і не можуть впевнено розрізнити марки продуктів, та споживачів, що мають повну інформацію і раціонально виконують вибір продукту на базі своїх бюджетних обмежень.

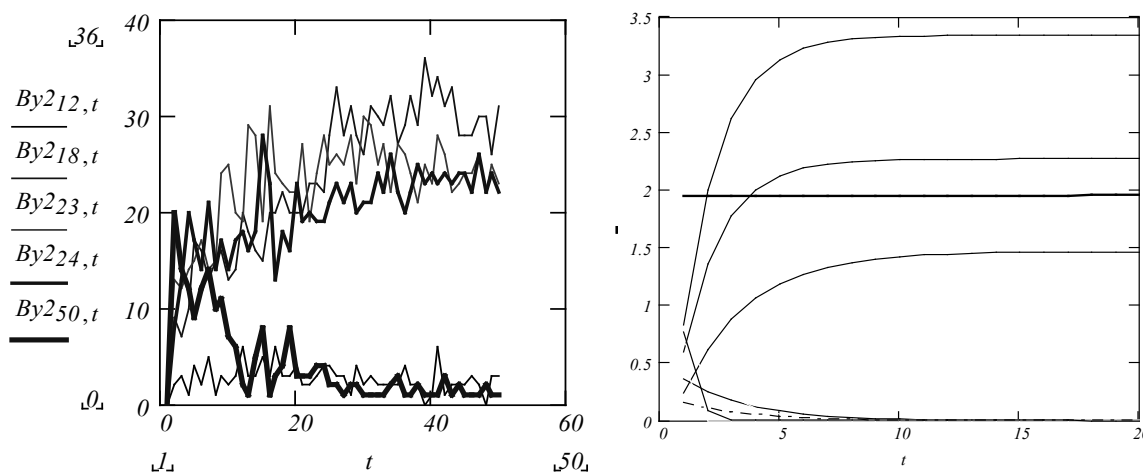


Рис. 8. Перехідні процеси для темпів продаж продуктів. Вплив випадкових збурень

На рис. 9. подано узагальнення результатів моделювання: розподіл споживачів за доходами і ранговий розподіл продуктів лінійки за ціною та гістограма темпів продаж продуктів, що є результатом імітаційного моделювання процесів функціонування і розвитку розподіленої системи «виробники — продукти — споживачі». Разом з гістограмою подано теоретичний розподіл, що є результатом отримання аналітичної моделі розподілу темпів продаж та ідентифікації її параметрів. Для отримання аналітичної моделі розподілу використані методологія і методи теорії процесів з розгалуженнями.

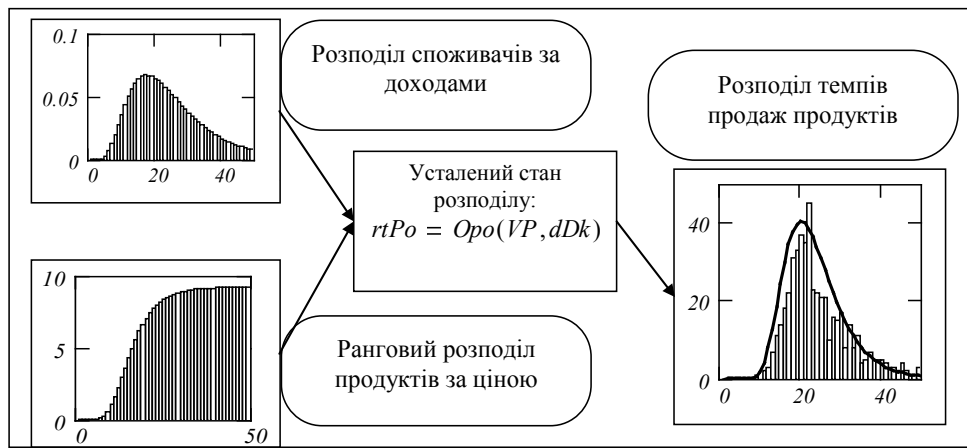


Рис. 9. Системні зв'язки для інтегрованих об'єктів: «частотний розподіл доходів споживачів», «ранговий розподіл продуктів за ціною», і «частотний розподіл темпів продаж продуктів лінійки»

Висновки

Запропонована методологія конструювання математичних моделей розподілених систем класу «виробники — продукти — споживачі» і розроблена декомпозиційна структура робочих моделей. Розроблена зручна для модифікації імітаційна модульна модель системи «виробники — продукти — споживачі», що потенційно може бути настроєна на специфіку будь-яких продуктів, технологій виробництва, моделей споживання та освоєння виробництва.

Орієнтація на оперативне створення нових моделей для нових задач приводить до необхідності формалізації, аналізу і оптимізації процесів конструювання систем моделей, а саме — створення моделей процесів конструювання моделей розвитку виробничих систем — метамodelей. Природно будувати метамodelі на базі раціональних технологій і раціональних структур, породжених структурно-функціонально-редукційною декомпозицією.

Практичне значення обчислювальних експериментів — визначення напрямків збирання даних в реальних системах для побудови системи підтримки рішень, розширення задач управління виробничими системами, обґрунтування необхідності проектування продуктів виробництва як розподілених об'єктів — лінійок продуктів, модельних рядів, необхідність розгляду споживачів як розподіленої цілісної системи з специфічними інформаційними зв'язками.

Теоретичне значення — визначення напрямків теоретичного обґрунтування виявлених властивостей системи, а саме, динамічних і статичних залежностей між частотним розподілом доходів і розподілом темпів продаж та частотними розподілами вибору споживачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беллман Р. Некоторые вопросы математической теории управления / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс. — М.: Издат. иностр. литер., 1962. — 233 с.
2. Месарович М. Д. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Д. Месарович, З. Мако, М. Такахара. — М.: Мир, 1973. — 310 с.
3. Месарович М. Д. Математическая теория систем / М. Д. Месарович, М. Такахара. — М.: Мир, 1978. — 311 с.
4. Пешель М. Моделирование сигналов и систем / М. Пешель. — М.: Мир, 1981. — 286 с.
5. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. [изд. 2.] — М.: Высшая школа, 1969. — 384 с.
6. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия / Дж. Форрестер; пер. с англ. — М.: Прогресс, 1971. — 340 с.
7. Шрейдер Ю. А. Системы и модели / Ю. А. Шрейдер, А. А. Шаров. — М.: Радио и связь, 1982. — 152 с.
8. Боровська Т. М. Декомпозиційні структури для прикладних програм синтезу регуляторів / Т. М. Боровська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — № 1. — С. 17—22.
9. Боровська Т. М. Оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі на базі агрегування виробничих функцій / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2005. — № 1 — С. 12—18.
10. Боровська Т. М. Моделювання багатопродуктових виробничих систем / Т. М. Боровська, С. П. Бадьора, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 1 — С. 48—54.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Надійшла до редакції 21.10.08
Рекомендована до друку 20.11.08

Боровська Таїса Миколаївна — доцент.

Кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет