

Т. М. Боровська, к. т. н., доц.; В. М. Кичак, д. т. н., проф.; М. В. Васильська

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

Розглядаються теоретичні і прикладні питання розробки імітаційних моделей для прогнозування і оптимального розвитку узагальнених виробничих систем, що створюють матеріальні продукти і послуги. Істотна відмінність від робіт-аналогів полягає в тому, що модель розвитку розглядається не як відображення розвитку реального об'єкту, а як еталон для створюваного реального об'єкту. Відповідно процес розвитку технічної системи розглядається як паралельний, взаємозв'язаний розвиток віртуальної і реальної систем. Побудована система моделей взаємозв'язаного розвитку системи, і її моделі.

Ключові слова: прогнозування, оптимальний розвиток, імітаційна модель, робоча модель, нечітка модель, метамодель, узагальнена виробнича система, векторизація.

Постановка проблеми. Багато сучасних технічних систем формально не мають статистики – тобто достатньо довгих інтервалів стабільності і відповідних статистичних рядів. Останніми роками розвиток стає все більш інноваційним. Існує клас моделей, що не помічається в масовій науці моделювання, – моделі-гіпотези, моделі-проекти для ще не створених систем. До моделювання як засобу прогнозування і планування розвитку спонукають великі обсяги випуску продукції. Постійно виникають ситуації, коли великі партії автомобілів, ноутбуків і продуктів харчування виявляються шкідливими і небезпечними. Природно усунути такі ризики на етапі імітаційного моделювання нового продукту, нової технології, нової виробничої системи. Моделювання розвитку – область математичного моделювання, якій не вистачає ефективних і конкретних постановок задач. Досі залишається прикладом раціонального підходу книга [1]. У ній розглянуті властивості систем, що розвиваються, формалізоване відображення і вивчення яких вимагає створення нових моделей динамічних систем. Уведений новий клас динамічних моделей, заснований на нелінійних

інтегро-функціональних рівняннях з передісторією, досліджені задачі моделювання розподілу ресурсів між галузями.

Постановка задачі. Поставимо мету – створення моделей для використання в системах підтримки прийняття рішень. Термін «розвиток» – надзвичайно багатозначний. Дотримуватимемося екологічної інтерпретації. Власне проблема – пробитися через традиційну парадигму: «модель – відображення істотних для дослідника властивостей об'єкту моделювання». Для процесів розвитку модель – це еталон для об'єкту, віртуальна реальність, істотні риси якої мають бути відображені в реальній виробничій системі. Ситуація, коли спочатку створюється імітаційна модель, а потім – реальний об'єкт, в техніці – правило, а не виключення. Імітаційна модель процесу розвитку підприємства повинна відображати не тільки поточний стан об'єкту моделювання, але і можливі майбутні стани, серед яких шукаються оптимальні і неприпустимі.

Вибір базової моделі узагальненої виробничої системи

Сьогодні імітаційна модель виробничої системи неповноцінна без повної імітаційної моделі зовнішнього оточення. Тому приймаємо таке рішення: моделюємо не одне це виробництво, а всю систему виробників деякого сегменту – виробництва, наприклад: косметики, космічних кораблів, авіаносців, автобусів; також включаємо в систему моделей моделі вибору і навчання споживачів. Останнє обумовлене тим, що сьогодні головна проблема для виробничих систем – глобалізація і гіперпропозиція. Таким чином ми

занурюємо модель одного підприємства в модель системи класу «N виробників, M продуктів, K споживачів». Такий підхід можна вважати за окремий випадок методу інваріантного занурення. Модель MNK-системи формуємо як множину моделей, впорядкованих трирівневою декомпозицією «повної моделі» у функціональні, структурні, редуковані субмоделі. У цій роботі один з методів отримання редукованих моделей – метод оптимального агрегування, що дозволяє замінювати систему виробничих елементів еквівалентним оптимальним елементом [4, 5].

Останній пункт концепції базової моделі: замість побудови моделей – апроксимацій статистичних даних будуємо спочатку моделі на базі фундаментальних законів предметної області, механізмів, що породжують спостережувані розподіли характеристик елементів в системах виробників. Статистичні дані притягуються на етапі верифікації моделі. Це методологія Форрестера [2, 3]. Реалізованість і корисність запропонованої концепції базової моделі виробничої системи перевірена створенням комплексів робочих моделей і результатами моделювання. Головне призначення імітаційних моделей – активне прогнозування – пошук таких, що ще не спостерігалися в реальності, рідкісних, але бажаних процесів розвитку, і ретельна інвентаризація численних але катастрофічних варіантів розвитку, що також ще не спостерігалися. У доступній сучасній літературі не знайдено прямих аналогів запропонованих моделей.

Шлях вирішення проблеми. Сьогодні потрібні методи і технології, які дозволяють створювати нові моделі для нових задач за 2 – 3 місяці, а не за 20 – 30 років. Вибрана концепція узагальненої робочої моделі «виробники, продукти, споживачі» дозволяє обговорювати «предметно» – на конкретних моделях проблему взаємодії об'єкту моделювання і моделі розвитку. При цьому природно виникає новий рівень моделювання: створення і аналіз метамоделі MNK-систем – процесу зміни в часі системи моделей MNK-системи.

Два класи процесів в системі «модель-об'єкт»

Моделі інноваційного розвитку належать до іншого прагматичного класу, на відміну від моделей-відображення існуючих реальних об'єктів або процесів. Назвемо ці класи так: 1) дескриптивні моделі, що описують існуючий реальний об'єкт; 2) прескриптивні моделі, що визначають, яким має бути майбутній реальний об'єкт. На рис. 1, 2 подано схеми процесів двох класів [6]. Ці графіки розраховані моделями першого наближення. Призначення цих моделей: вже на початку розробки перекласти словесний опис механізмів розвитку в кількісну модель. «Механізм», закладений в цю модель, – «імовірнісне зростання з обмеженням довільними законами розподілів імовірностей і нечіткостей».

На рис. 1 наступний сценарій: деяка виробнича система і стабільно випускає продукцію. Стрілки – відображення обміну інформацією між об'єктом і моделлю.

На рис. 2 сценарій: для деякого інноваційного проекту створюється імітаційна модель, яка видавати інформацію для корекції моделі і уточнення проекту об'єкту. Зпочатком створення виробничої системи вирішення багатьох проблем шукаються на моделі, виконується обмін інформацією і взаємна адаптація моделі і об'єкту, модель виходить на задовільні рівні адекватності.

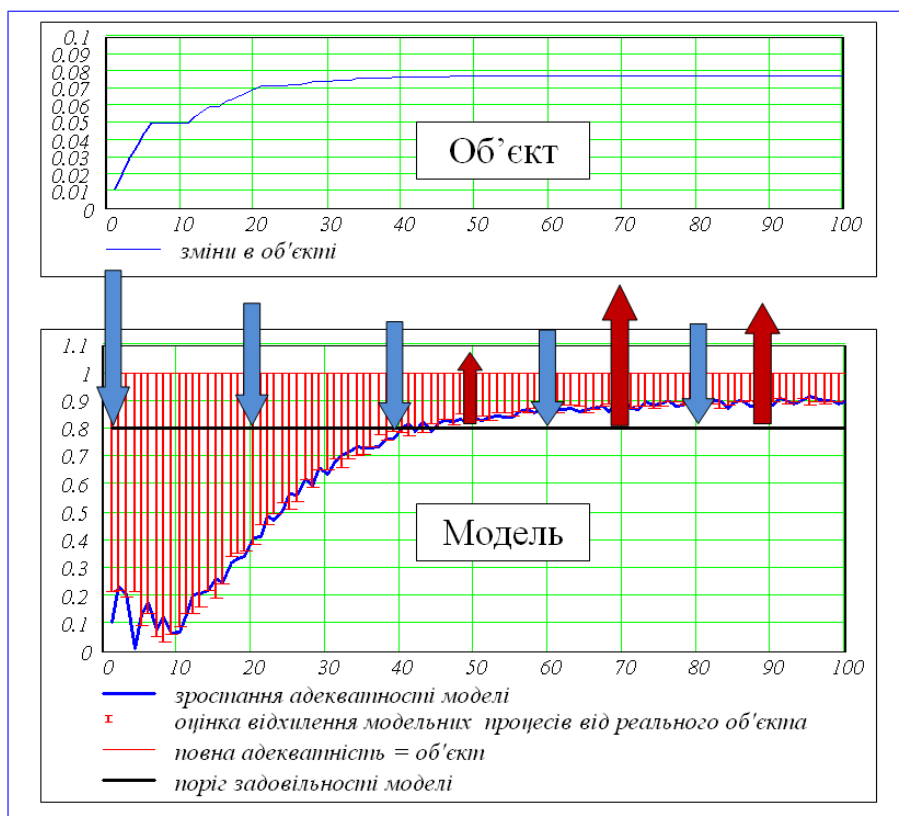


Рис. 1. Схема процесу «побудови моделі існуючого об'єкту»

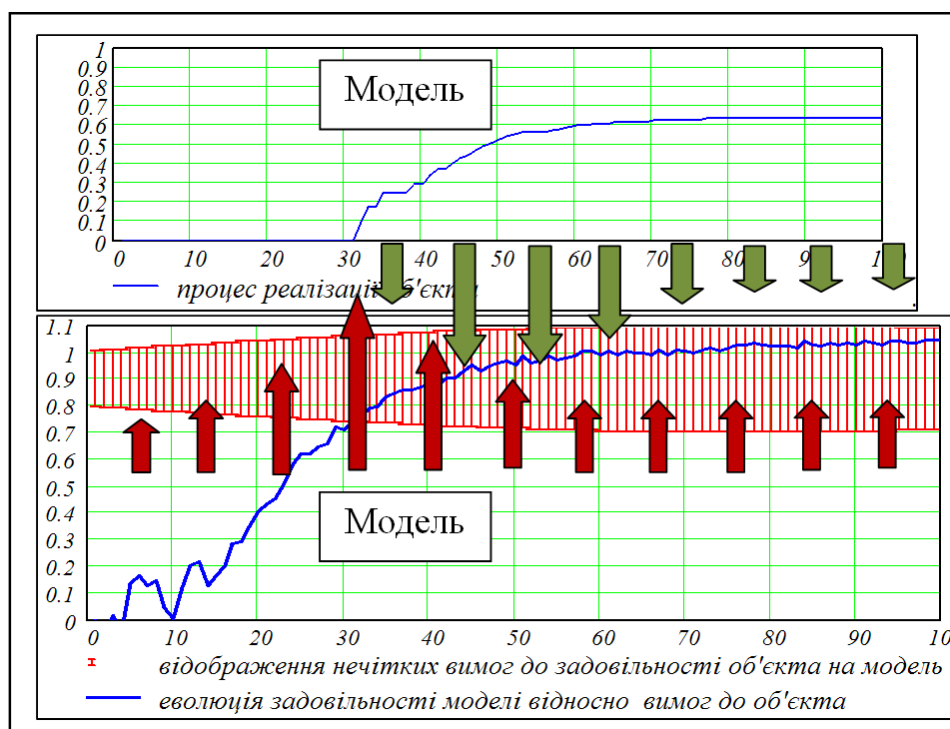


Рис. 2. Схема процесу «побудови нової моделі для нового об'єкту»

У конструюванні математичних моделей для нових об'єктів домінують невизначеності і збурення, проте діють також процеси навчання і освоєння. У модель другого наближення

вводимо чинники – «новизна» і «освоєння», що задаються відповідно коефіцієнтами β_1 і β_2 . Ці коефіцієнти нормовані: $0 \leq \beta_1 \leq 1$, значення $\beta_1 = 0$ відповідає новизні технічної системи, а $\beta_1 = 1$ – відсутність новизни, для реальних систем діапазон: $0.80 \leq \beta_1 \leq 1$. Аналогічно, для освоєння: $0 \leq \beta_2 \leq 1$, $\beta_2 = 0$ – «моментальне» освоєння, $\beta_2 = 1$ – відсутність освоєння для реальних систем $0.80 \leq \beta_2 \leq 1$.

Детермінована модель розвитку системи «модель-об'єкт»

У першому наближенні конструювання моделі розвитку ми дали якісний опис інформаційних взаємозв'язків моделі і об'єкту моделювання. У другому наближенні деталізуємо ці зв'язки, будуємо детерміновані кількісні моделі зв'язків. На рис. 3 подано схему цих зв'язків.

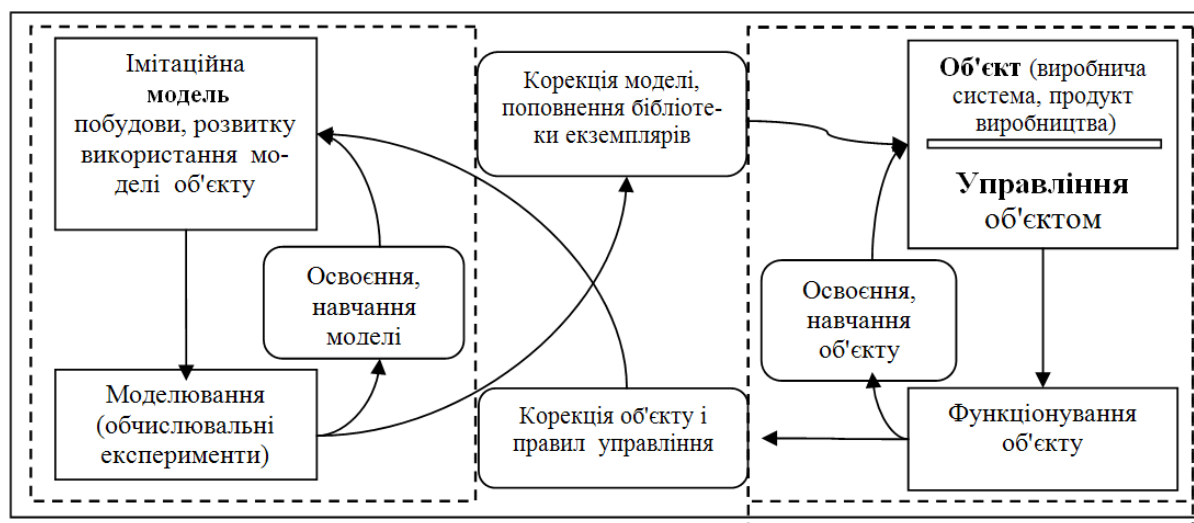


Рис. 3. Схема інформаційного обміну в системі «модель – об'єкт»

Детермінована безперервна модель побудови моделі виробничої системи зроблена на базі схеми (рис. 3). Змінні і функції: $x_1(t)$ – рівень задовільності моделі, $0 \leq x_1(t) \leq 1$; $x_2(t)$ – рівень готовності виробництва до випуску продукції, $0 \leq x_2(t) \leq 1$, $fmm(x_1(t))$ – функція впливу досягнутого рівня моделі на темп зростання моделі; $fpm(x_2(t))$ – функція впливу виробництва на темп рівня моделі; $Inm(t)$ – темп витрат на розробку. Модель розвитку моделі об'єкту

$$\frac{d}{dt} x_1(t) = fmm(x_1(t)) \cdot (1 - x_1(t)) \cdot Inm(t) \cdot fpm(x_2(t)). \quad (1)$$

Детермінована безперервна модель розвитку виробничої системи. Змінні і функції: $fpp(x_1(t))$ – функція впливу виробництва на темп рівня виробничої системи; $fmp(x_2(t))$ – функція впливу моделі об'єкту на темп рівня виробничої системи; $Inp(t)$ – темп витрат на створення виробничої системи. Модель розвитку виробничої системи:

$$\frac{d}{dt} x_2(t) = fpp(x_2(t)) \cdot (1 - x_2(t)) \cdot Inp(t) \cdot fmp(x_1(t)). \quad (2)$$

Детермінована дискретна модель системи "модель-об'єкт". Ми робимо робочі моделі, що виконуються в середовищі математичного пакету. Один і той же вираз у цьому середовищі може мати різні визначення. Введемо позначення для правих частин рівнянь (1) і (2):

$$F \text{ mod}(x_1, x_2, fmm, fpm, VPm) = fmm(x_1(t)) \cdot (1 - x_1(t)) \cdot Inm(t) \cdot fpm(x_2(t)), \quad (3)$$

$$F \text{ prs}(x_1, x_2, fpp, fmp, VPP) = fpp(x_2(t)) \cdot (1 - x_2(t)) \cdot Inp(t) \cdot fmp(x_1(t)), \quad (4)$$

де fmm, fpm, fpp, fmp – функції зворотних і перехресних зв'язків в системі; VPm, VPp – вектори параметрів моделі: "спочатку модель – потім об'єкт". Запишемо різниці рівняння системи.

$$\begin{pmatrix} x1_{k+1} \\ x2_{k+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} x1_k \\ x2_k \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} F \text{ mod}(x1_k, x2_k, fmm0, fpm0, um, k) \\ Fprs(x1_k, x2_k, fpp0, fmp0, up, k) \cdot (k > 40) \end{bmatrix} \cdot \Delta T. \quad (5)$$

На рис. 4 подано приклади процесів розвитку, отримані на моделі (5). Це: 1 – слабкі перехресні зв'язки, 2 – сильний вплив об'єкту на модель, 4 – сильний взаємовплив, 5 – сильний вплив моделі на об'єкт, 3, 6 – створення моделі з різною інтенсивністю перехресних зв'язків.

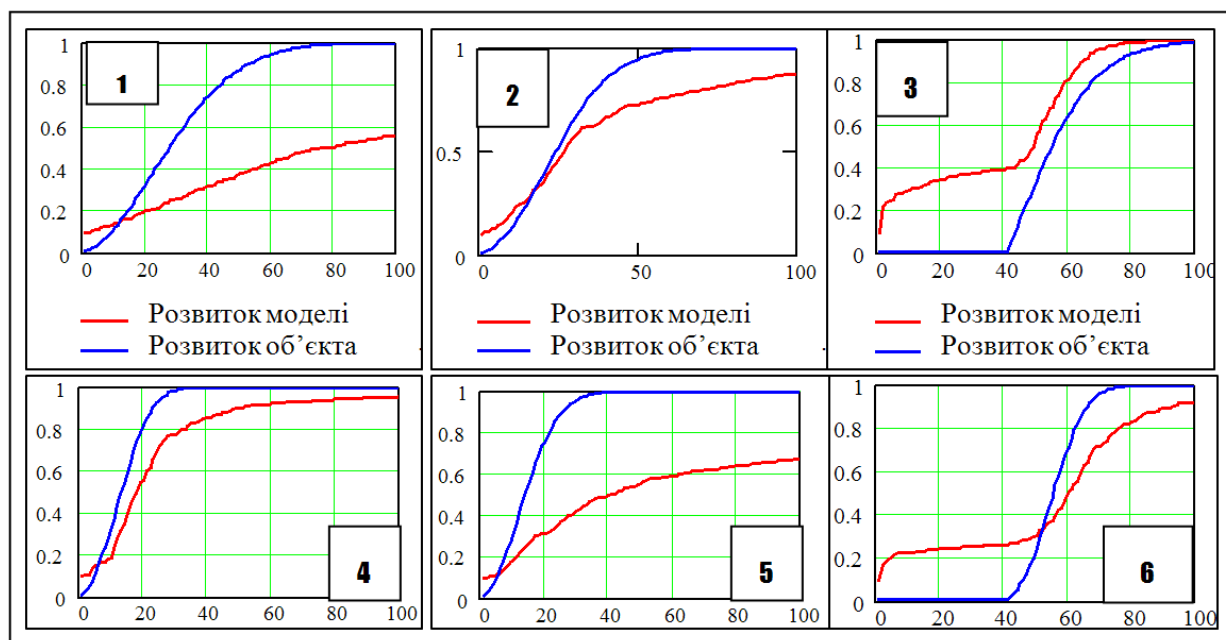


Рис. 4. Приклади моделювання системи «модель-об'єкт»

Врахування реалій створення і розвитку нових виробничих систем привело до нової постановки задачі моделювання процесів розвитку. Як об'єкт процесу розвитку розглядається система «модель-об'єкт». Побудована базова робоча модель такої системи; отримані результати моделювання відповідають емпіричним даним. Запропонований підхід і модель відповідають тренду інтеграції імітаційної моделі і виробничої системи.

На основі детермінованої моделі створюємо і досліджуємо модель на базі нечіткої логіки. Модель процесу побудови моделі не є черговим ієрархічним рівнем моделі розподіленої виробничої системи, а саме метамоделлю. Особливість моделювання процесів інноваційного розвитку полягає в тому, що спочатку створюється модель – засіб для швидкого, невитратного і безпечного випробування варіантів розвитку. Будується деталізована комплексна модель функціонування і розвитку виробничої системи як інтерпретація абстрактної моделі розвитку. Метамодель в рамках цієї роботи – це метапроцес розвитку системи моделей, кінцевий стан якого – задовільна модель інноваційного розвитку розподіленої системи, що реалізується.

Програми визнані видом промислової продукції; фактично і моделі-предиктори є видом промислової продукції – існує такий сектор як «модельний бізнес». На рівні виробництва продукту зв'язок моделі і об'єкту конкретний: модель є заміником об'єкту при проведенні небезпечних випробувань і пошуку нових проектних рішень. На рівні виробничої системи зв'язку "модель функціонування виробничої системи – виробнича система" мають

імовірнісний і нечіткий характер.

Практиці потрібні відповіді на два питання:

– що вибрати: відразу будувати виробничу систему, або спочатку створити імітаційну модель, а потім на базі результатів моделювання швидко і безпомилково створювати виробничу систему;

– наскільки модель адекватна майбутній виробничій системі.

Саме для відповідей на такі питання призначені моделі цієї роботи.

Один прикладів впровадження досліджень – виробництво сільгосптехніки для малих господарств на підприємстві оборонного сектору. Ця продукція за умови сумісності з наявною технологічною базою (єдиною в світі) підприємства значно підвищує його ефективність. О потреби в такій продукції істотно невизначені, короточасні, а конструкції і технології малої сільгосптехніки повинні постійно оновлюватися. За відсутності раціонального управління розвитком таке побічне виробництво гарантовано приносить збитки. Оптимальне ризикове управління дає гарантований середній прибуток. Тому дослідження зв'язків в системі «модель – об'єкт» важливі для практики, а в теорії породжують новий підхід до розвитку як процесу коеволюції моделі і об'єкту.

Технологія побудови нечіткої моделі системи

Зв'язки в системі «модель-об'єкт» переважно інформаційні, імовірнісні, нечіткі, нелінійні, але мають точний словесний опис. Метамоделю процесу розвитку створена в три етапи:

- розробка незв'язаних моделей розвитку об'єкту і розвитку моделі;
- розробка детермінованої моделі системи «об'єкт – модель»;
- розробка ймовірнісної моделі системи «об'єкт – модель».

Розроблена технологія конструювання ймовірнісних і нечітких функцій впливу:

- функція впливу $fp(X)$ визначається в області $0 \leq X \leq X_{\max}$; $0 \leq Y \leq Y_{\max}$;
- розподіли ймовірностей $dp(X)$ або нечіткостей $df(X)$, визначаються залежністю параметрів розподілів від змінних X, Y :

$$dpr(X) \Rightarrow dpr(X, Vpp(X, Y)); \quad dfz(X) \Rightarrow dfz(X, Vpf(X, Y)), \quad (6)$$

де Vpp, Vpf – вектори параметрів відповідних розподілів.

Збираються оператори (програмні модулі) переходу від детермінованої до ймовірнісної функції

$$Y = fp(X) \Rightarrow fpf(X, Y), \quad (7)$$

де X, Y – значення вхідної і розмитої початкової змінних. fpf – функція ймовірності (приналежності), що нормується. На рис. 5 наведено приклад результатів моделювання.

Складені системи «об'єкт – модель» – агреговані одновимірні моделі розвитку об'єкту і моделі, змінні стани яких – рівні готовності моделі і об'єкту. Наступний крок розробки і дослідження – побудова двох версій замкнутої моделі з класу MNK-моделей.

На базі зафіксованої послідовності етапів процесу створення системи розробляємо деталізовану метамоделю процесу побудови імітаційної моделі сегменту виробництва «виробники, продукти, споживачі». У цій моделі імітується функціонування кожного виробника, продукту, користувача. Розмірність тестових систем була 10 виробників, 100 продуктів, 1000 користувачів.

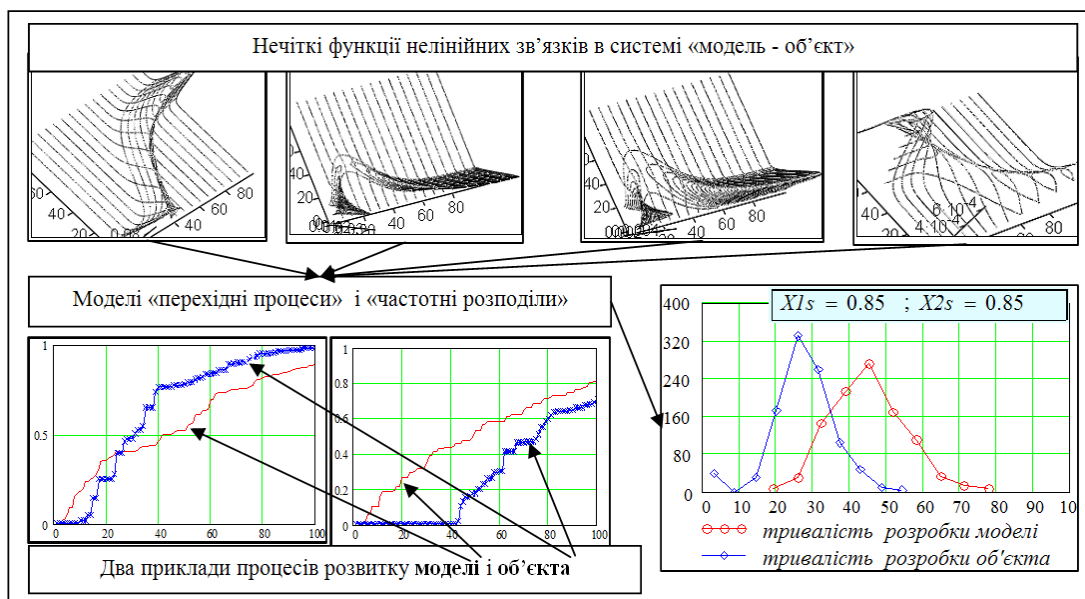


Рис. 5. Нечітка метамодель процесу розвитку. Приклад результатів моделювання

Реєстрація і контроль функціонування кожного продукту, кожного споживача – звичайна практика в багатьох сегментах виробництва: виробники літаків, автоперевізники в онлайні отримують інформацію, виробники у власних гіпермаркетах отримують дані на кожного «карткового» покупця. Ця інформація використовується для аналізу, прогнозування і планування. Ця інформація стає більш «інформативною» і надійною, якщо паралельно відтворюється в імітаційній моделі. Виробнича система, яка не вивчає, не своїх користувачів, і не вчиться у користувачів, деградує.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глушков В. М. Моделирование развивающихся систем / В. М. Глушков, В. В. Иванов, В. М. Яненко. – М.: Наука, 1983. – 353 с.
2. Беллман Р. Некоторые вопросы математической теории управления / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс. – М.: Издат. иностр. литер., 1962. – 233 с.
3. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.
4. Боровська Т. М. Декомпозиційні структури для прикладних програм синтезу регуляторів / Т. М. Боровська // Вісник ВПІ. – 2000. – № 1. – С. 12 – 18.
5. Боровська Т. М. Нечітка оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі при неопуклих виробничих функціях елементів / Т. М. Боровська, І. С. Колесник, В. А. Северілов // Вісник ВПІ. – 2003. – № 5. – С.36 – 41.
6. Боровская Т. Н. Конструирование моделей развивающихся систем / Т. Н. Боровская // *Materialy VI miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Stosowane naukowe opracowania – 2010»*, Praha (Ceska). – Przemysl: Nauka i studia, 2010. – Volume 8. – P. 7 – 12.

Боровська Таїса Миколаївна – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних систем управління; інститут автоматики, електроніки і комп'ютерних систем управління.

Кичак Василь Мартинович – д. т. н., професор кафедри телекомунікаційних систем і телебачення; інститут радіотехніки, зв'язку і приладобудування.

Васильська Майя Валеріївна – аспірант кафедри телекомунікаційних систем і телебачення; інститут радіотехніки, зв'язку і приладобудування.

Вінницький національний технічний університет.