

Т. Н. Боровская, к. т. н., доц.; В. М. Кичак, д. т. н., проф.; М. В. Васильская

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Рассматриваются теоретические и прикладные вопросы разработки имитационных моделей для прогнозирования и оптимального развития обобщенных производственных систем, создающих материальные продукты и услуги. Существенное отличие от работ-аналогов состоит в том, что модель развития рассматривается не как отражение развития реального объекта, а как эталон для создаваемого реального объекта. Соответственно процесс развития технической системы рассматривается как параллельное, взаимосвязанное развитие виртуальной и реальной систем. Построена система моделей взаимосвязанного развития системы и её модели.

Ключевые слова: прогнозирование, оптимальное развитие, имитационная модель, рабочая модель, нечеткая модель, метамодель, обобщенная производственная система, векторизация.

Постановка проблемы. Многие современные технические системы формально не имеют статистики – т. е. достаточно длинных интервалов стабильности и соответствующих статистических рядов. В последние годы развитие становится всё более инновационным. Существует класс моделей, не замечаемый в массовой науке моделирования – модели-гипотезы, модели-проекты для ещё не созданных систем. К моделированию как средству прогнозирования и планирования развития вынуждают большие объёмы выпуска продукции. Постоянно возникают ситуации, когда большие партии автомобилей, ноутбуков и продуктов питания оказываются вредными и опасными. Естественно устранить такие риски на этапе имитационного моделирования нового продукта, новой технологии, новой производственной системы. Моделирование развития – область математического моделирования, которой не хватает эффективных и конкретных постановок задач. До сих пор остаётся примером рационального подхода книга [1]. В ней рассмотрены свойства развивающихся систем, формализованное отображение и изучение которых требует создания новых моделей динамических систем. Введён новый класс динамических моделей, основанный на нелинейных интегро-функциональных уравнениях с предысторией, исследованы задачи моделирования распределения ресурсов между отраслями.

Постановка задачи. Поставим цель – создание моделей для использования в системах поддержки принятия решений. Термин «развитие» чрезвычайно многозначный. Будем придерживаться экологической интерпретации. Собственно проблема – пробиться через традиционную парадигму: «модель – отражение существенных для исследователя свойств объекта моделирования». Для процессов развития модель – это эталон для объекта, виртуальная реальность, существенные черты которой должны быть отображены в реальной производственной системе. Ситуация, когда сначала создается имитационная модель, а затем – реальный объект, в технике – правило, а не исключение. Имитационная модель процесса развития предприятия должна отражать не только текущее состояние объекта моделирования, но и возможные будущие состояния, среди которых ищутся оптимальные и недопустимые.

Выбор базовой модели обобщённой производственной системы

Сегодня имитационная модель производственной системы неполноценна без полной имитационной модели внешнего окружения. Поэтому выбираем такое решение: моделируем не одно данное производство, а всю систему производителей некоторого сегмента – производства, например: косметики, космических кораблей, авианосцев, автобусов; также включаем в систему моделей модели выбора и обучения потребителей. Последнее

обусловлено тем, что сегодня главная проблема для производственных систем – глобализация и гиперпредложение. Таким образом мы погружаем модель одного предприятия в модель системы класса «N производителей, M продуктов, K потребителей». Такой подход можно считать частным случаем метода инвариантного погружения. Модель MNK-системы формируем как множество моделей, упорядоченных трёхуровневой декомпозицией «полной модели» в функциональные, структурные, редуцированные субмодели. В данной работе один из методов получения редуцированных моделей – метод оптимального агрегирования, позволяющий заменять систему производственных элементов эквивалентным оптимальным элементом [4, 5].

Последний пункт концепции базовой модели: вместо построения моделей – аппроксимаций статистических данных, строим сначала модели на базе фундаментальных законов предметной области, механизмов, порождающих наблюдаемые распределения характеристик элементов в системах производителей. Статистические данные привлекаются на этапе верификации модели. Это методология Форрестера [2, 3]. Реализуемость и полезность предложенной концепции базовой модели производственной системы проверена созданием комплексов рабочих моделей и результатами моделирования. Главное назначение имитационных моделей – активное прогнозирование – поиск ненаблюдавшихся в реальности, редких, но желательных процессов развития, и тщательная инвентаризация многочисленных, но пока не наблюдавшихся, катастрофических вариантов развития. В доступной современной литературе не найдено прямых аналогов предложенных моделей.

Путь решения проблемы. Сегодня нужны методы и технологии, которые позволяют создавать новые модели для новых задач за 2 – 3 месяца, а не за 20 – 30 лет. Выбранная концепция обобщённой рабочей модели системы «производители, продукты, потребители» позволяет обсуждать «предметно» – на конкретных моделях проблему взаимодействия объекта моделирования и модели развития. При этом естественно возникает новый уровень моделирования: создание и анализ метамодели MNK-систем – процесса изменения во времени системы моделей MNK-системы.

Два класса процессов в системе «модель-объект»

Модели инновационного развития принадлежат к иному прагматическому классу, в отличие от моделей-отображения существующих реальных объектов или процессов. Назовем эти классы так: 1) дескриптивные модели, описывающие существующий реальный объект; 2) прескриптивные модели, определяющие, каким должен быть будущий реальный объект. На рис. 1, 2 представлены схемы процессов двух классов [6]. Эти графики рассчитаны моделями первого приближения. Назначение этих моделей: уже в начале разработки переложить словесное описание механизмов развития в количественную модель. «Механизм», заложенный в данную модель, – «вероятностный рост с ограничением с произвольными законами распределений вероятностей и нечёткостей».

На рис. 1 отображён следующий сценарий: некоторая производственная система отлажена и стабильно выпускает продукцию. Стрелки – отображение обмена информацией между объектом и моделью.

На рис. 2 отображён сценарий: для некоторого инновационного проекта создаётся имитационная модель, которая начинает выдавать информацию для коррекции модели и уточнения проекта объекта. С началом создания производственной системы решения многих проблем ищутся на модели, выполняется обмен информацией и взаимная адаптация модели и объекта, модель выходит на удовлетворительные уровни адекватности.

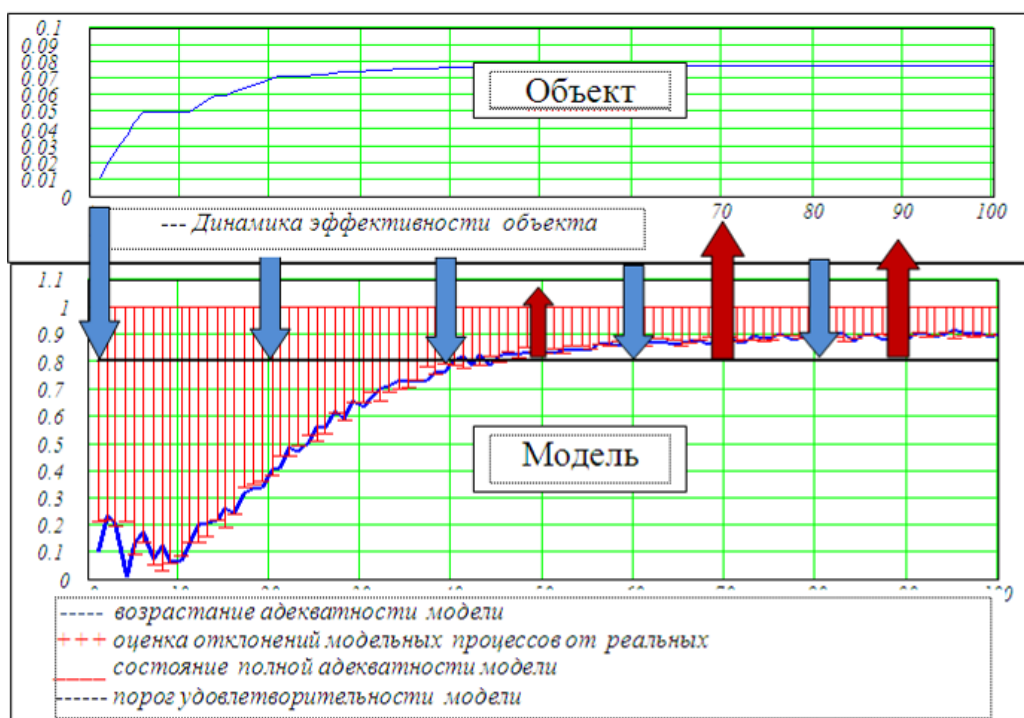


Рис. 1. Схема процесса «построение модели существующего объекта»

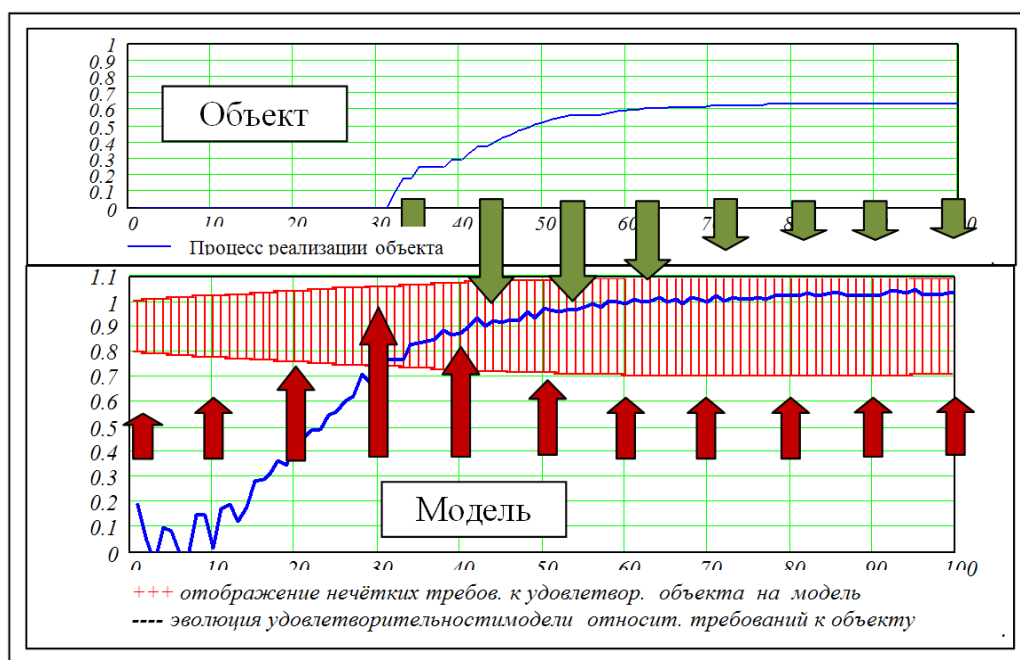


Рис. 2. Схема процесса «построение новой модели для нового объекта»

В конструировании математических моделей для новых объектов доминируют множественные неопределённости и возмущения, однако действуют также множественные процессы обучения и освоения. В модель второго приближения вводим факторы – «новизна» и «освоение», задаваемые соответственно коэффициентами β_1 и β_2 . Эти коэффициенты нормированы: $0 \leq \beta_1 \leq 1$, значение $\beta_1 = 0$ соответствует полной новизне технической системы, а $\beta_1 = 1$ – отсутствие новизны, для реальных систем диапазон: $0,80 \leq \beta_1 \leq 1$. Аналогично, для освоения: $0 \leq \beta_2 \leq 1$, $\beta_2 = 0$ – «моментальное» освоение, $\beta_2 = 1$ – отсутствие освоения, для реальных систем $0,80 \leq \beta_2 \leq 1$.

Детерминированная модель развития системы «модель-объект»

В первом приближении конструирования модели развития мы дали качественное описание информационных взаимосвязей модели и объекта моделирования. Во втором приближении детализируем эти связи, строим детерминированные количественные модели связей. На рис. 3 представлена схема этих связей.

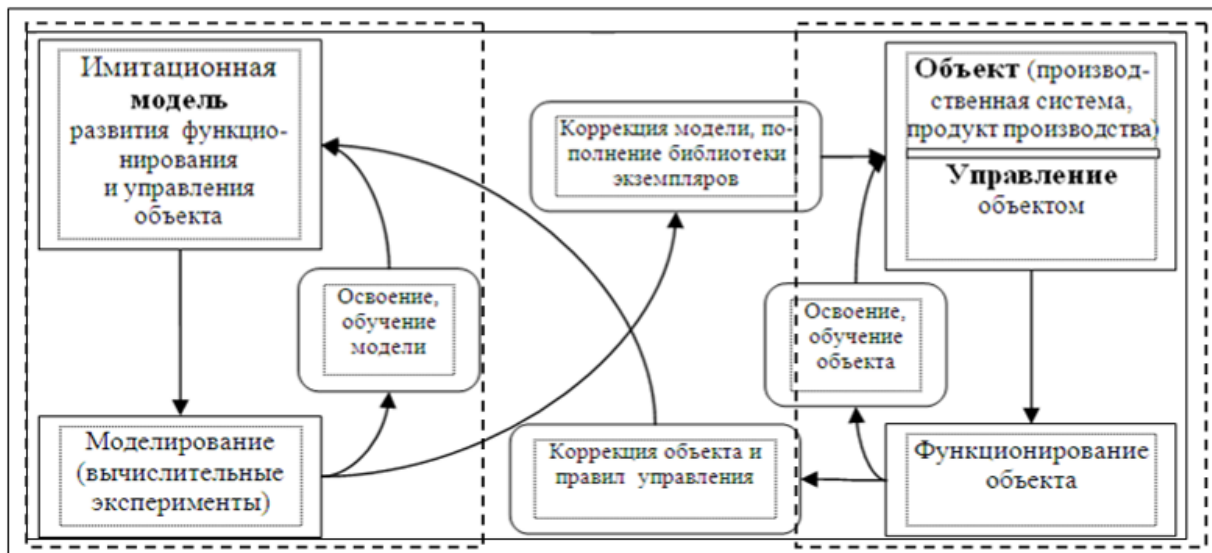


Рис. 3. Схема информационного обмена в системе «модель-объект»

Детерминированная непрерывная модель построения модели производственной системы сделана на базе схемы (рис. 3). Переменные и функции: $x_1(t)$ – уровень удовлетворительности модели, $0 \leq x_1(t) \leq 1$; $x_2(t)$ – уровень готовности производства к выпуску продукции, $0 \leq x_2(t) \leq 1$, $fmm(x_1(t))$ – функция влияния достигнутого уровня модели на темп роста модели; $fpm(x_2(t))$ – функция влияния производства на темп уровня модели; $Inm(t)$ – темп затрат на разработку. Модель развития модели объекта

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

Детерминированная непрерывная модель развития производственной системы. Переменные и функции: $fpp(x_1(t))$ – функция влияния производства на темп уровня производственной системы; $fmp(x_2(t))$ – функция влияния модели объекта на темп уровня производственной системы; $Inp(t)$ – темп затрат на создание производственной системы. Модель развития производственной системы:

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

Детерминированная дискретная модель системы "модель-объект". Мы делаем рабочие модели, выполняемые в среде математического пакета. Одно и то же выражение в этой среде может иметь различные определения. Введём обозначения для правых частей уравнений (1) и (2):

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

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

где fmm, fpm, fpp, fmp – функции обратных и перекрёстных связей в системе; VPm, VPP – векторы параметров модели: "сначала модель – затем объект". Запишем разностные уравнения системы.

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

На рис. 4 представлены примеры процессов развития, полученные на модели (5). Это: 1 – слабые перекрёстные связи, 2 – сильное влияние объекта на модель, 4 – сильные взаимовлияния, 5 – сильное влияние модели на объект, 3, 6 – создание модели с разной интенсивностью перекрёстных связей.

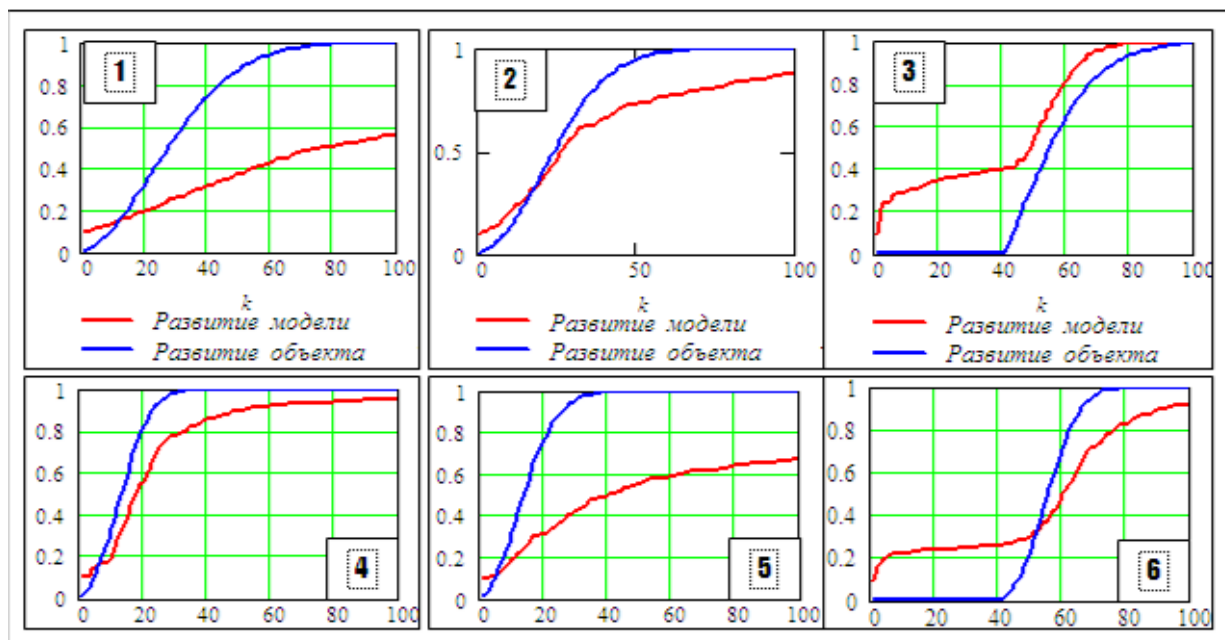


Рис. 4. Примеры моделирования системы «модель-объект»

Учёт реалий создания и развития новых производственных систем привёл к новой постановке задачи моделирования процессов развития. В качестве объекта процесса развития рассматривается система «модель-объект». Построена базовая рабочая модель такой системы; полученные результаты моделирования соответствуют эмпирическим данным. Предложенный подход и модель соответствуют тренду интеграции имитационной модели и производственной системы.

На основе детерминированной модели создаём и исследуем модель на базе нечеткой логики. Модель процесса построения модели не является дежурным иерархическим уровнем модели распределенной производственной системы, а именно метамоделью. Особенность моделирования процессов инновационного развития состоит в том, что сначала создается модель – средство для быстрого, нерасходного и безопасного испытания вариантов развития. Строится детализированная комплексная модель функционирования и развития производственной системы как интерпретация абстрактной модели развития. Метамодель в рамках данной работы – это метапроцесс развития системы моделей, конечное состояние которого – удовлетворительная, реализуемая модель инновационного развития распределенной системы.

Программы признаны видом промышленной продукции; фактически и модели-предикторы являются видом промышленной продукции – существует такой сектор как «модельный бизнес». На уровне производства продукта связь модели и объекта конкретна: модель является заменителем объекта при проведении опасных испытаний и поиске новых проектных решений. На уровне производственной системы связи "модель функционирования производственной системы – производственная система" имеют вероятностный и нечеткий характер.

Практике нужны ответы на два вопроса:

– что выбрать: сразу строить производственную систему, либо сначала создать имитационную модель, а затем на базе результатов моделирования быстро и безошибочно создавать производственную систему;

– насколько модель адекватна будущей производственной системе.

Именно для ответов на такие вопросы предназначены модели данной работы.

Один из примеров внедрения исследований – производство сельхозтехники для малых хозяйств на предприятии оборонного сектора. Эта продукция при условии совместимости с наличной технологической базой (иногда единственной в мире) предприятия значительно повышает его эффективность. Однако потребности в такой продукции существенно неопределенные, кратковременные, а конструкции и технологии малой сельхозтехники должны постоянно обновляться. При отсутствии рационального управления развитием такое побочное производство гарантированно приносит убытки. Оптимальное рисковое управление даёт гарантированную среднюю прибыль. Поэтому исследование связей в системе «модель-объект» важны для практики, а в теории порождают новый подход к развитию как процессу коэволюции модели и объекта.

Технология построения нечёткой модели системы

Связи в системе «модель-объект» преимущественно информационные, вероятностные, нечеткие, нелинейные, но имеют достаточно точное словесное описание. Метамодель процесса развития создана в три этапа:

- разработка несвязанных моделей развития объекта и развития модели;
- разработка детерминированной модели системы «объект – модель»;
- разработка вероятностной модели системы «объект – модель».

Разработана технология конструирования вероятностных и нечетких функций влияния:

- функция влияния $fp(X)$ определяется в области $0 \leq X \leq X_{\max}$; $0 \leq Y \leq Y_{\max}$;
- распределения вероятностей $dp(X)$ или нечеткости $df(X)$ определяются зависимостью параметров распределений от переменных X, Y :

$$dp(X) \Rightarrow dp(X, Vpp(X, Y)); \quad df(X) \Rightarrow df(X, Vpf(X, Y)), \quad (6)$$

где Vpp, Vpf – векторы параметров соответствующих распределений.

Собираются операторы (программные модули) перехода от детерминированной к вероятностной функции

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

где X, Y – значение входной и размытой исходной переменных. fpf – функция вероятности (принадлежности), нормируемая. На рис. 5 приведен пример результатов моделирования.

Составные системы «объект – модель» – агрегированные одномерные модели развития объекта и модели, переменные состояния которых – уровни готовности модели и объекта. Следующий шаг разработки и исследования – построение двух версий замкнутой модели из класса MNK-моделей.

На базе зафиксированной последовательности этапов процесса создания системы разрабатываем детализированную метамодель процесса построения имитационной модели сегмента производства «производители, продукты, потребители». В этой модели имитируется функционирование каждого производителя, продукта, пользователя. Размерность тестовых систем была 10 производителей, 100 продуктов, 1000 пользователей.

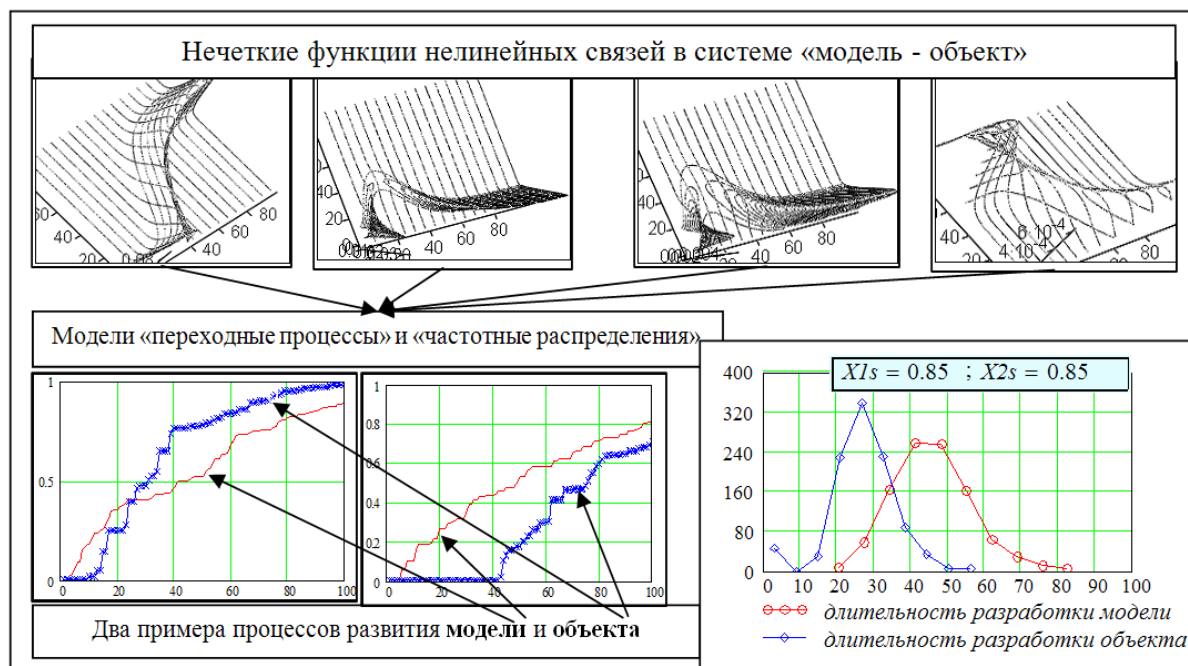


Рис. 5. Нечёткая метамодель процесса развития. Пример результатов моделирования

Регистрация и контроль функционирования каждого продукта, каждого потребителя – обычная практика во многих сегментах производства: производители самолетов, автоперевозчики в онлайн получают информацию, производители в собственных гипермаркетах получают данные на каждого «карточного» покупателя. Эта информация используется для анализа, прогнозирования и планирования. Эта информация становится более «информативной» и надёжной, если параллельно воспроизводится в имитационной модели. Производственная система, которая не изучает, не учит своих пользователей, и не учится у пользователей, деградирует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 naukowí-praktycznej konferencji «Stosowane naukowe opracowania – 2010», Praha (Ceska). – Przemysl: Nauka i studia, 2010. – Volume 8. – P. 7 – 12.

Боровская Таиса Николаевна – к. т. н., доцент кафедры компьютерных систем управления; институт автоматизации, электроники и компьютерных систем управления.

Кичак Василий Мартынович – д. т. н., профессор кафедры телекоммуникационных систем и телевидения; институт радиотехники, связи и приборостроения.

Васильская Майя Валериевна – аспирант кафедры телекоммуникационных систем и телевидения; институт радиотехники, связи и приборостроения.

Винницкий национальный технический университет.