

# Виртуальное моделирование и интеллектуальное управление сложными компьютерно-интегрированными системами<sup>1</sup>

И.М. Макаров, В.З. Рахманкулов, А.А. Ахрем

**Аннотация.** В настоящей статье рассмотрены проблемы построения виртуальных моделей для исследования и проектирования современных сложных компьютерно-интегрированных производств. С системных позиций исследуются проблемы управления производством на разных уровнях структурной иерархии и проблемы применения виртуальных моделей для интеллектуализации управления на уровне производственно-технологических задач, оперативно-тактических и стратегических решений.

## Введение

Термины «виртуальная модель» и «виртуальная реальность» обычно ассоциируются с компьютерными играми, когда с помощью различных устройств виртуальной реальности – аудио, визуальных, сило-моментных, тактильных и других – имитируется физическая реальность, что позволяет получить так называемый «эффект присутствия» или близкое к реальному воздействию на органы чувств человека со стороны искусственно созданной компьютерной модели. В результате игры, усиленные виртуальной реальностью, в значительной степени отличаются от традиционных игр и приобретают «живые» черты, вызывая тем самым дополнительный интерес играющих. Однако игры – не единственная область приложения виртуального моделирования, значение виртуальных компьютерных моделей гораздо шире и выходит далеко за рамки индустрии развлечений. В последние

десятилетия виртуальные модели получили широкую популярность в самых различных областях – научных исследованиях, инженерном проектировании, архитектурном дизайне, управлении физическими объектами и интеллектуальными процессами.

Благодаря объемной фотореалистической визуализации физических объектов и процессов на экране компьютера в процессе виртуального моделирования стала возможной полная имитация зрительного восприятия разнообразных статических и динамических состояний физической реальности. Достижения объемной визуализации были быстро востребованы в системах автоматизированного проектирования (САПР), где переход от плоской проективной и каркасной объемной графики к 3-мерной фотореалистической графике оказал революционное воздействие на весь процесс проектирования, сделав иллюзию пространственного геометрического представления основным инструментом повышения каче-

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 04-01-00386) и комплексной программы Президиума РАН «Математическое моделирование и интеллектуальные системы» (проект № 2.44)

ства процессов анализа и синтеза проектных моделей. Поэтому виртуальное моделирование все больше становится стержневой технологией современного компьютерного проектирования и позволяет исследовать десятки, сотни и даже тысячи вариантов конструкций сложных машин и механизмов, моделируя на компьютере реальные условия их работы, сравнивая альтернативные варианты и выбирая наилучшие для создания более совершенных изделий, уменьшая при этом многократно затраты времени, финансовых и материальных средств благодаря замещению многих реальных проектных работ виртуальными проектными процессами. Именно феномен замещения физической реальности виртуальной реальностью представляет наибольший интерес для развития этого перспективного направления информационной технологии. Однако не любая виртуальная модель создает эффект замещения. Для этого, прежде всего, виртуальное моделирование должно отвечать базовым критериям адекватности и грубости по отношению к моделируемой физической реальности.

В статье исследуются свойства адекватности виртуальных моделей и связанных с ними условий возникновения эффекта замещения. Рассмотрены проблемы построения виртуальных моделей для исследования и проектирования современных сложных компьютерно-интегрированных производств.

## 1. Фундаментальные свойства виртуальных компьютерных моделей

Отличие от традиционного подхода к виртуальным моделям, по существу, как к абстрактным математическим моделям, авторами развивается подход, который ставит виртуальные компьютерные модели в промежуточное положение между математическими моделями и моделируемыми физическими объектами. Это позволяет рассматривать виртуальную модель одновременно как математическую и как физическую, реализуемую с помощью физического устройства – компьютера, который, в свою очередь, функционирует полностью в соответствии с основными физическими законами. При таком подходе к ключевым критериям

математических моделей – адекватности и грубости – добавляется новое фундаментальное свойство виртуальных моделей – способность к *частичному, полному или превосходящему замещению* физической реальности компьютерными моделями. Заметим, что математическая модель всегда считается приближенной копией физического объекта, а степень приближения определяется ее точностью и адекватностью, кроме того, выходом математической модели являются результаты вычислений или преобразованные уравнения, поэтому вопрос о замещении физического объекта математической моделью обычно даже не ставится. Виртуальные компьютерные модели допускают такую постановку. Особенно интересным и нетривиальным свойством является способность виртуальных моделей к превосходящему замещению физических объектов. Это означает, что совокупность свойств виртуальной модели может быть богаче свойств имитируемой физической реальности. Эффект замещения становится возможным благодаря симбиозу виртуальной и физической реальностей, который возникает в компьютере. По существу, компьютерная реализация даже абстрактных положений – это одна из разновидностей физической реальности. В подтверждение можно сказать, что компьютер, так же как и любое физическое устройство, «не пропускает» ошибки, допущенные в математическом или программном описании физического объекта, и правильно реагирует на эти ошибки в соответствии с физической сущностью своей архитектуры, являясь активным средством верификации теоретических и алгоритмических предположений о свойствах физической реальности.

Таким образом, виртуальное моделирование может не только имитировать, но и замещать физическую реальность, поэтому виртуальные компьютерные модели можно разделить на два больших класса – *репликационные* и *транспозиционные*.

Репликационные виртуальные модели – это модели, которые имитируют физическую реальность, но при этом не предназначены для замещения физических объектов или процессов. В этом смысле репликационные виртуаль-

ные модели мало чем отличаются от аналитических или имитационных моделей, реализуемых на компьютере.

Транспозиционные виртуальные модели – это компьютерные модели, которые не только имитируют физическую реальность, но и могут реализовать частичное, полное или превосходящее замещение физических объектов и процессов. Характерной особенностью процесса транспозиции как процесса замещения физического объекта компьютерной моделью является преобразование одного вида физической реальности в другой, а не простая замена одного физического объекта другим.

Исследование фундаментальных свойств виртуальных компьютерных моделей становится все более актуальным на современном этапе развития компьютерной и информационной технологий, когда наступила эра широкой компьютеризации физических объектов, процессов, систем и мир встроенных систем начал покрывать почти всю традиционную технику. При этом транспозиционное виртуальное моделирование вышло за рамки только задач анализа таких физических сущностей, помогая по-новому ставить и решать задачи синтеза и, следовательно, способствуя эффективному созданию более совершенных технологий и продукции.

## 2. Адекватность и грубость виртуальных моделей

Компьютерная реализация сложных математических моделей часто наталкивается на ограниченную производительность компьютера и требует использования вычислительных ресурсов, превышающих возможности выбранной компьютерной системы. В таких случаях приходится пользоваться методами редукции моделей, то есть приведением математических или виртуальных моделей к более простому виду. Среди многочисленных подходов к проблеме редукции можно выделить две основные группы используемых методов.

Первую группу составляют так называемые методы моделей первого приближения, при которых исследуемая сложная модель заменяется более простой моделью первого приближения с известными основными свойствами

решений, а исходная модель рассматривается как возмущенная. При определенном сочетании свойств модели первого приближения и возмущений удается сделать заключение о качественном поведении решений возмущенной модели и количественных соотношениях между некоторыми важными характеристиками обеих моделей. Методы и модели первой группы будем в дальнейшем называть грубыми. В этой группе авторами исследуются следующие методы:

- из общей теории проектирования сложных технических систем:

- модели выбора максимальных (оптимальных, лучших) вариантов проектируемой системы на основе аппроксимации бинарных отношений сравнительной эффективности вариантов и аппроксимации функций выбора [2,3];

- модели анализа влияния возмущений принципов оптимальности на устойчивость получаемых решений [4];

- из общей теории синтеза динамических моделей сложных технических систем:

- методы анализа устойчивости (асимптотической устойчивости, неустойчивости) решений квазилинейных динамических дифференциальных моделей по устойчивости систем их первого приближения для случаев, когда эти системы являются либо стационарными, либо периодическими, либо правильными, либо системами с медленно меняющимися коэффициентами [5,6];

- методы построения дифференциальных моделей сравнения для исследования устойчивости нелинейных динамических систем на базе аппарата теории дифференциальных неравенств и векторных функций Ляпунова [7,8];

- методы проектирования динамических систем по прототипу на основе принципа усреднения Крылова-Боголюбова и его обобщений [9].

Вторую группу образуют методы редукции, основанные на сопоставлении исходной модели и эквивалентной ей в некотором смысле (изоморфной, гомоморфной) более простой модели, полученной из исходной в результате определенного преобразования (морфизма).

Важно, что при таких преобразованиях сохраняются интересующие исследователя свойства исходных моделей. Заметим, что редукция сложной модели к гомоморфной ей модели целесообразна тогда, когда последняя имеет более простой вид или существует компьютерно-ориентированный алгоритм ее решения. Сохранение существенных свойств при гомоморфизмах позволяет решить требуемую задачу сначала для упрощенной виртуальной модели, а затем перенести полученное решение на исходную систему с помощью морфизма. Вторая группа методов редукции исследуется авторами в следующих направлениях:

- в общей теории проектирования сложных технических систем:
  - оздание методов декомпозиции сложных задач выбора максимальных вариантов проектируемых систем на основе общей схемы последовательного анализа и отбраковки вариантов [10,11];
  - разработка математических методов исследования процессов проектирования по известному прототипу на базе алгоритмов теории аппроксимации множеств выбора и гомоморфизмов оптимизационных решающих процессов [12];
- в теории проектирования динамических систем:
  - исследование свойств линейных нестационарных систем, приводимых ляпуновскими преобразованиями к системам с постоянными коэффициентами [13];
  - нахождение алгебраических и геометрических критериев грубой диагонализуемости, декомпозируемости, устойчивости спектра характеристических показателей Ляпунова с помощью ляпуновских морфизмов [13,14].

Результаты, полученные авторами в названных выше направлениях, связаны с нахождением необходимых и достаточных условий для редукции исходных моделей физических систем до гомоморфных им виртуальных моделей.

Ниже представлены результаты исследований по грубой диагонализуемости и декомпозируемости динамических систем.

### 3. Геометрические критерии грубой диагонализуемости и устойчивости спектра характеристических показателей Ляпунова линейных дифференциальных систем

Рассмотрим линейную динамическую систему вида

$$\dot{x} = A(t)x, \quad (x \in \mathbb{R}^n, t \geq 0), \quad (1)$$

где  $\mathbb{R}^n$  – конечномерное евклидово пространство размерности  $n \geq 2$ ;

$x \equiv \text{col}(x^{(1)}, \dots, x^{(n)})$  – вектор-столбец;

$A(t)$  – ограниченная и непрерывная при  $t \geq 0$  матричная функция.

Отождествляя линейную систему (1) с матрицей-функцией  $A(t)$ , определим в множестве  $S_n$  всех систем вида (1) расстояние формулой

$$d(A(t), B(t)) \equiv \sup_{t \geq 0} \|A(t) - B(t)\| = \sup_{t \geq 0} \sup_{x \in \mathbb{R}^n, x \neq 0} |(A(t) - B(t))x| |x|^{-1}.$$

Напомним, что система (1)

- называется диагонализуемой, если существует ляпуновский морфизм

$$x = L(t)y,$$

где  $L(t)$  – вещественная матричная функция

такая, что  $L = \frac{dL(t)}{dt}$  существует и нормы

$\|L(t)\|, \|\dot{L}(t)\|, \|L^{-1}(t)\|$  ограничены при  $t \geq 0$ , переводящий систему (1) в систему с диагональной матрицей

$$\dot{y} = B(t)y, \quad B(t) = L^{-1}(t)A(t)L(t) - L^{-1}(t)\dot{L}(t), \quad (2)$$

$$B(t) = \text{diag}(b_1(t), \dots, b_n(t));$$

- называется приводимой к системе вида (2) с интегрально разделенной диагональю, если коэффициенты диагональной матрицы  $B(t)$  удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\int b_i(s) - b_{i+1}(s) ds \geq b(t - \tau) - r,$$

где  $b > 0, r \geq 0$ ;

- называется системой с интегральной разделенностью, если найдутся положительные числа  $a, c$  и решения  $x_1(t), \dots, x_n(t)$  системы (1), удовлетворяющие при всяких  $t \geq \tau \geq 0, I = 1, \dots, n-1$ , неравенствам

$$\|x_i(t)\|_{x_{i+1}(\tau)} / \|x_{i+1}(t)\|_{x_i(\tau)} \geq ce^{a(t-\tau)};$$

• обладает устойчивым спектром показателей Ляпунова  $\lambda_1(A), \dots, \lambda_n(A)$ , если для любого  $\varepsilon > 0$  найдется  $\sigma > 0$  такое, что из  $\|M(t)\| < \sigma$  вытекает, что

$$|\lambda_i - \mu_i| < \varepsilon \quad (i=1, \dots, n),$$

где  $\lambda_i, \mu_i$  – характеристические показатели Ляпунова, соответственно, линейных дифференциальных систем (1) и

$$\dot{u} = (A(t) + M(t))u \quad (u \in \mathbb{R}^n, t \geq 0),$$

пронумерованных в порядке убывания.

Напомним также, что некоторое свойство решений системы вида (1) называется грубым, если существует достаточно малая окрестность  $W_n(A)$  точки  $A(t)$  в метрическом пространстве  $S_n$  такая, что это свойство выполняется для любой системы

$$\dot{z} = C(t)z \quad (z \in \mathbb{R}^n, t \geq 0, C(t) \in W_n(A))$$

из окрестности  $W_n(A)$ .

В [14] В.М. Миллионщиковым доказаны алгебраические критерии грубой интегральной разделенности, грубой диагонализуемости и грубой устойчивости спектра показателей Ляпунова для приведенных выше систем. В работе авторов настоящей статьи [15] получен ряд геометрических критериев диагонализуемости, декомпозируемости, интегральной разделенности и устойчивости систем вида (1). Ниже приведены базовые утверждения относительно свойств грубой диагонализуемости, интегральной разделенности, устойчивости спектра показателей Ляпунова.

### Теорема 1

Для линейной дифференциальной динамической системы типа (1) следующие условия эквивалентны:

а) система (1) имеет нормальную фундаментальную систему решений  $x_1(t), \dots, x_n(t)$ , удовлетворяющую следующему условию геометрической регулярности: для любого  $\varepsilon > 0$  существует  $\sigma > 0$  такое, что у всякой линейной динамической системы

$$\dot{v} = B(t)v \quad v \in \mathbb{R}^n, t \geq 0,$$

$$d(A(t), B(t)) < \sigma,$$

найдутся решения  $v_1(t), \dots, v_n(t)$ , для которых

$$\sup_{t \geq 0} \angle(x_i(t), v_i(t)) < \varepsilon \quad (i=1, \dots, n)$$

где  $\angle$  – угол между ненулевыми векторами  $x, v \in \mathbb{R}^n$ .

в) система (1) является интегрально разделенной;

с) система (1) диагонализуема;

д) система (1) приводима к диагональной системе вида (2) с интегрально разделенной диагональю;

е) система (1) обладает устойчивым спектром различных характеристических показателей Ляпунова  $\lambda_1(A) > \dots > \lambda_n(A)$ .

Теорема 1 устанавливает условия адекватности гомоморфной виртуальной системы по отношению к исходной системе при ляпуновских морфизмах.

Учитывая, что множество  $IS_n$  интегрально разделенных дифференциальных динамических систем вида (1) открыто и всюду плотно в метрическом пространстве  $S_n$  [16], справедлива следующая

### Теорема 2

Свойства (а-е) решений линейных дифференциальных систем из утверждения теоремы 1 типичны и грубы в метрическом пространстве  $S_n$ .

Теорема 2 устанавливает условия грубости гомоморфной виртуальной системы при выполнении условий теоремы 1 и при возмущениях виртуальной модели, эти условия определяют характеристическое свойство замещения исходной системы виртуальной моделью.

Таким образом, приведенные утверждения показывают, что компьютерное решение задачи на основе гомоморфной виртуальной модели, являясь по существу прототипным физическим решением, может частично или полностью заменять исходное физическое решение.

## 4. Виртуальное моделирование современных компьютерно-интегрированных производственных систем

Концепция компьютерно-интегрированных производств возникла в конце 1980-х годов, когда стал очевиден успех первого этапа авто-

матизации управления предприятиями на основе локальных компьютерных сетей.

В эволюции компьютерного управления предприятиями можно наблюдать два характерных этапа.

Первый этап был связан с автоматизацией управления внутренними бизнес-процессами предприятия, и локальные сети открыли путь для интеграции сначала небольшого числа внутренних производственных процессов, а затем интеграция распространилась на все основные производственные процессы предприятия. Сквозной цикл компьютерного управления от проектирования до изготовления продукции стал стержневой технологией компьютерно-интегрированных производств.

Второй этап автоматизации управления предприятиями наступил с появлением новых технологий глобальных сетей, в первую очередь – сети Интернет, которые обеспечили универсальный механизм интеграции и взаимодействия разных участников и субъектов бизнеса: производителей, поставщиков, потребителей, банков и т.п., независимо от их географического расположения и времени протекания активных фаз бизнес-процессов. В результате системное представление об объекте управления кардинально изменилось: элементы внешней среды стали неотъемлемой частью структуры предприятия. Следовательно, появились новые возможности для управляемого взаимодействия предприятия с внешней средой с целью повышения эффективности внутренних и внешних бизнес-процессов. Конечно, в отличие от первого этапа автоматизации внутренних процессов предприятия, где присутствовала значительная доля физической интеграции «островков» автоматизации, компьютерная интеграция предприятий с внешней средой на основе глобальных сетей произошла не столько физически, сколько виртуально – так, например, иногда предприятия, работающие через глобальную сеть Интернет, даже не знают, где территориально располагается их партнер по бизнесу. В результате концепция компьютерно-интегрированных производственных систем в последние годы была существенно расширена и дополнена такими понятиями, как «виртуальное предприятие»

и «е-бизнес», которые отражают виртуальную сущность интеграции удаленных друг от друга подразделений, филиалов, компаний и фирм, объединяющих свои ресурсы для выполнения общих целей.

В условиях углубления и расширения интеграции предприятий вплоть до глобальных масштабов и повсеместного распространения компьютерных методов решения проблем, все большее значение приобретают виртуальные компьютерные модели и виртуальное моделирование интеграционных процессов. При этом проблема интеграции имеет сложный системный характер, отсюда и виртуальное моделирование должно обладать свойственной интегрированностью, взаимосвязанностью методов и моделей.

Представленные в настоящей статье исследования базируются на системном подходе и охватывают теоретические и прикладные проблемы виртуального моделирования компьютерно-интегрированных производственных систем на разных структурных уровнях описания таких систем:

- производственно-технологическом,
- оперативно-тактическом,
- стратегическом.

#### **4.1. Производственно-технологический уровень**

На этом уровне фундаментальные свойства виртуального моделирования – адекватность, грубость, способность к замещению – исследуются на проблемах виртуального адаптивного и интеллектуального управления обрабатывающим технологическим оборудованием, промышленными роботами, транспортно-складскими системами. Основное внимание здесь придано не только доказательствам адекватности и грубости виртуальных компьютерных моделей, но и созданию новых эффективных компьютерных моделей с частичным, полным или превосходящим замещением реальных процессов.

Широкое распространение в компьютерно-интегрированном производстве на этапах технической и технологической подготовки производства получили методы off-line обучения и программирования роботов, когда построение

программных траекторий движения робота ведется на его виртуальной графической модели с помощью решения прямых и обратных задач кинематики и динамики. Хорошо известны преимущества такого подхода, главное из которых – устранение необходимости в использовании физического робота для выполнения полного цикла обучения движениям на компьютерной модели. Таким образом, при решении задачи программирования роботов виртуальная модель полностью замещает физическое устройство, позволяя не прерывать технологический цикл работы робота. Этот способ оказался столь эффективным, что сегодня все современные промышленные роботы снабжены виртуальными трехмерными графическими моделями в качестве стандартных средств обучения и программирования. Еще до появления коммерческих систем виртуального программирования роботов в 1990-е годы авторами настоящей статьи исследовался данный подход и была предложена конкретная реализация одной из первых разработок в России, получившей название система off-line программирования роботов «Апрограф» [17,18].

Однако следует отметить, что задача виртуального программирования роботов была успешно решена для определенного класса роботов. Это так называемые программно-управляемые роботы первого поколения, действующие по заранее заданным жестким программам управления. Такие роботы до сих пор являются наиболее массовыми средствами роботизации и автоматизации в промышленности. С помощью виртуального программирования удалось значительно повысить эффективность применения роботов первого поколения.

Но на современном этапе все большее значение приобретают роботы следующих поколений – адаптивные и интеллектуальные роботы, которые обеспечены внешней сенсорикой и гибкими, динамически перестраиваемыми интеллектуальными программами управления. Кроме того, промышленные роботы наряду с другими средствами автоматизации вовлекаются во все более глубокую компьютерную интеграцию производства и бизнеса компаний, что приводит к определенному снижению роли

сугубо автономного функционирования роботов и повышению зависимости их работы от распределенных, но взаимосвязанных функций производства, реализуемых через локальные, корпоративные и открытые сети. В связи с этим традиционный подход к виртуальному программированию роботов, основанный на построении жестких программ управления, уже не отвечает требованиям новых задач и поэтому возникает необходимость его дальнейшего развития.

В соответствии с тенденциями усложнения процессов виртуального программирования роботов были переработаны концепции, заложенные в систему «Апрограф». Новая система «Апрограф+» позволяет учесть возможность обучения как программно-управляемых, так и адаптивных и интеллектуальных роботов. Кроме того, в системе предусмотрены функции сетевого управления роботами не только для локальных сетей, но и пока еще экспериментально исследуемые функции управления в открытых сетях, в частности, функции управления роботами через Интернет.

Система «Апрограф+» имеет клиент-серверную архитектуру. Клиентская часть предназначена для реализации иерархической многоуровневой структуры гомоморфных виртуальных моделей различных роботов и их систем, функционирующих в сетевой среде. Серверная часть выполняет широкий набор функций – от полной имитации систем управления реальными роботами до формирования мультиагентной структуры интерфейсов между виртуальными моделями и сенсорными либо приводными системами реальных роботов. Сервер располагается в непосредственной близости от реального робота или связан с роботом через локальную вычислительную сеть (ЛВС). Клиентская часть может находиться на любом удалении от реального робота и связана с сервером через Интернет, корпоративную сеть, ЛВС.

Иерархическая многоуровневая структура гомоморфных виртуальных моделей системы «Апрограф+» включает следующие модули.

- *Модуль контурного управления и решения задач кинематики/динамики движения робота.* Виртуальные гомоморфные модели это-

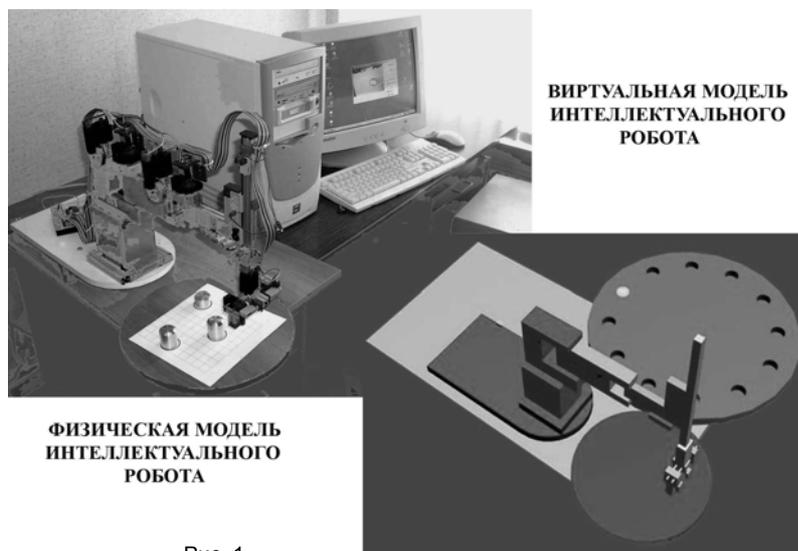


Рис. 1.

го модуля имеют полное кинематическое подобие с реальными роботами, а модели динамики позволяют имитировать свойства устойчивости и качества управления, выявляемые у реальных роботов. Фотореалистические трехмерные графические виртуальные модели выполнены на основе пакетов программ 3D Studio Max, DirectX, OpenGL, Visual Studio.net, OGRE и реалистично воспроизводят как самих роботов, так и их окружающую рабочую среду (Рис.1). На основе графического интерфейса пользователя автоматически решаются прямые и обратные задачи кинематики и динамики роботов. С помощью данного модуля имитируется нижний исполнительный уровень контурного управления роботами. Виртуальные модели модуля могут полностью замещать робот при реализации задачи обучения и программирования. В то же время виртуальные модели могут взаимодействовать с реальным роботом в процессе его работы.

- *Модуль адаптивного управления.* Виртуальные модели этого модуля, во-первых, имитируют внешние системы очувствления роботов, позволяя решать задачу адаптивного управления в идеальной постановке для сенсорных устройств, но с учетом гомоморфных моделей кинематики и динамики роботов. Во-вторых, модели обеспечены интерфейсами с сервером для получения информации через сеть от реальных сенсоров и корректировки

модельных контуров адаптации. Так же как и на уровне задач кинематики и динамики, задачи программирования адаптивного управления могут решаться без реальных роботов или совместно с реальными роботами и их системами очувствления.

- *Модуль интеллектуального управления.* Если в задачах контурного и адаптивного управления предполагается, что решаемая задача известна в большей или меньшей степени и существует исходная информация для построения желаемой программной траектории движения робота, то при интеллектуальном

управлении желаемая программная траектория движения отсутствует. Программирование интеллектуального управления в данном случае происходит в два этапа: на первом этапе робот должен самостоятельно выбрать или определить (распознать) решаемую задачу, а после этого на втором этапе, автоматически сформируется программа движения робота для выявленной задачи. В зависимости от используемой техники искусственного интеллекта и применяемого способа интеллектуального управления робот выявляет решаемую задачу с помощью методов поиска, принятия решений, обработки знаний. Входная информация для виртуальных моделей интеллектуального управления формируется на основе речевого диалога «человек-робот» с использованием анализатора и синтезатора речи Dragon Naturally Speaking 8. Речевой диалог построен таким образом, что оператор инициализирует диалог, но затем ведущим звеном в диалоге является робот, который своими «подсказками» направляет ход решения задачи, используя специально созданную базу знаний. В существующей реализации база знаний строится на основе механизмов и алгоритмов поиска на деревьях решений. Виртуальные модели интеллектуального управления обеспечивают возможность превосходящего замещения реальных роботов в случаях, когда реальные роботы не имеют собственного интеллекту-

ального управления. Виртуальная модель наделяет обычный робот интеллектуальным поведением в процессе решения задачи обучения и программирования.

- *Модуль сетевого управления.* Этот модуль обеспечивает удаленное взаимодействие виртуальных моделей и реального оборудования. После виртуального решения задач программирования роботов результаты решения передаются по сети и транслируются сервером для физических устройств. Сигналы обратных связей с физических устройств передаются по сети на клиентские станции с виртуальными моделями. Таким образом обеспечивается работа всей системы в замкнутом контуре через сетевую среду. Модуль реализует решение задач сетевого управления на основе протоколов обмена локальных вычислительных сетей, глобальной сети Интернет, сетей мобильной связи.

Таким образом, свойство замещения виртуальными моделями физических устройств и процессов становится базой не только для теоретических исследований, но и для более эффективного решения практических производственных задач. При этом частичное замещение, когда часть компьютеризированных функций выполняет виртуальная модель, а другая часть остается за технологическим оборудованием, применимо непосредственно к технологическим операциям и процессам. Полное и превосходящее замещение хорошо работает в процессах подготовки и контроля производства, а также в процессах проектирования и прототипирования.

#### **4.2. Уровень оперативно-тактических решений**

На данном уровне реализуются основные производственные задачи предприятия и принимаются оперативные решения по управлению производством. Современные системы управления компьютерно-интегрированными производствами обязательно включают в свой состав необходимые средства поддержки процессов принятия решений (СППР). Алгоритмическое и программное обеспечение СППР для аналитических приложений создается в направлении, получившем название «бизнес-интеллект» (business intelligence). Такая интеллектуальная компьютерная поддержка приня-

тия решений основана на обработке больших объемов информационных данных, оперативно накапливаемых и хранящихся в базах и хранилищах данных. При этом «сырые» данные должны быть подготовлены и проанализированы прежде, чем их можно было бы использовать непосредственно в процессе принятия решений. Подготовка данных, по существу, является процессом извлечения знаний, скрытых в больших объемах текущей информации. В настоящее время все более широкое распространение получают современные средства анализа данных для компьютерной поддержки решений, основанные на новой технологии оперативной многомерной обработки данных или OLAP-технологии (On-Line Analytical Processing) [19,20]. Очень важно, что средства OLAP-анализа исходно построены на принципах многомерной модели данных, которая более адекватно, по сравнению с одномерными моделями, отображает реальный процесс принятия решений, где человек всегда оперирует многомерными представлениями и многомерной информацией.

Ввиду большого разнообразия аналитических задач, решаемых предприятием в целом и его отдельными подразделениями, а также учитывая разный масштаб производственных систем, а, следовательно, и объемы обрабатываемой ими информации, аналитические OLAP-системы создаются с ориентацией на различные классы предприятий – крупные корпорации глобального масштаба либо компании среднего и малого бизнеса.

Системы для крупного бизнеса отличаются широким функционалом, высокой производительностью, большими объемами обрабатываемой информации, но и очень высокой стоимостью, достигающей нескольких десятков и даже сотен тысяч долларов.

Системы для среднего и малого бизнеса гораздо компактней, имеют более низкую стоимость, но рассчитаны на меньшие объемы обрабатываемых данных. Среди таких систем выделим интегрированные OLAP-решения, функционал которых единообразно охватывает все основные компоненты аналитической системы – базы данных, хранилище, гиперкубовую структуру, генераторы отчетов, средства

быстрой разработки и отладки приложений. Благодаря взаимной согласованности всех необходимых функций, интегрированный подход обладает определенными преимуществами как при разработке аналитических систем, так и в процессе эксплуатации OLAP-системы.

Авторами настоящей статьи исследуется и развивается подход к созданию аналитических СППР на основе интегрированных OLAP-систем, которые имеют хорошую перспективу стать наиболее массовым инструментом для многомерного анализа данных и интеллектуальной обработки информации в целях поддержки принятия решений в компаниях малого и среднего бизнеса, являющихся, как известно, опорной движущей силой рыночной экономики.

Ввиду сравнительной новизны OLAP-технологии и по причине высокой стоимости OLAP-систем корпоративного уровня, почти все компании начинают создание своих аналитических приложений с пилотных проектов ограниченного масштаба. При этом сразу закладывать в пилотный проект дорогое решение очень рискованно. Рациональным подходом становится использование интегрированного решения небольшого масштаба с возможно более полной функциональностью и последующий переход на мощную и дорогую систему после освоения приложений и выявления всех преимуществ и недостатков выбранного подхода к реализации аналитических задач.

Такой способ разработки аналитических СППР хорошо согласуется с концепцией виртуального моделирования, когда пилотный проект можно представить в виде гомоморфной виртуальной модели желаемого процесса аналитической обработки данных на предприятии. Виртуальная аналитическая система на основе интегрированного OLAP-решения может не охватывать весь объем данных предприятия в связи с имеющимися в таких системах ограничениями по памяти и производительности, но основные характеристические свойства решаемых аналитических задач воспроизводятся виртуальной системой с необходимой точностью. Авторы настоящей статьи на протяжении 10 лет успешно используют виртуальный подход при проектировании OLAP-приложений в программной среде биз-

нес-интеллекта для промышленных и крупных оптовых торговых предприятий. Применение виртуального подхода на практике показывает, что в процессе создания корпоративной аналитической системы удается получить существенную экономию ресурсов предприятия за счет сокращения сроков разработки и снижения расходов на дорогие консультативные услуги со стороны производителей лицензионного программного обеспечения или фирм-интеграторов.

Виртуальный пилотный проект аналитической системы необходим для демонстрации возможностей OLAP-технологии по консолидации данных из различных источников, созданию многоуровневой архитектуры хранилищ данных, построению многомерных моделей данных, реализации процедур многомерного анализа информации, «дружественной» интерпретации результатов анализа для непрограммирующих пользователей. В процессе пилотного проектирования разрабатываются несколько прикладных задач первой очереди. При выборе задач для анализа учитываются следующие основные соображения:

- многомерному анализу подвергаются показатели деятельности предприятия, оказывающие влияние на принятие управленческих решений на разных уровнях структуры организации и для разных горизонтов планирования деятельности;
- анализируемая информация способствует формированию новых знаний при сборе и обработке данных в хронологическом порядке;
- имеющиеся данные позволяют проводить всесторонний анализ деятельности компании, используя большое число критериев, декомпозицию по любым разрезам или сечениям данных, агрегирование показателей на разных уровнях структурирования информации;
- анализ данных осуществляется в динамическом режиме по мере выполнения текущих бизнес-процессов и накопления информации в OLTP системах.

После завершения пилотного проекта интегрированная OLAP-система может использоваться и дальше в процессе масштабирования задач, либо она сохраняет свое значение для развития систем поддержки решений, так как

новые приложения легче осваивать и отлаживать с помощью интегрированного продукта. Кроме того, часто пилотное решение в дальнейшем используют в качестве параллельной штатной системы для мониторинга ошибок, возникающих в рабочей аналитической системе, корпоративных хранилищах и базах данных. В компаниях малого и среднего бизнеса при ограниченных объемах анализируемых данных пилотное решение вполне пригодно для дальнейшего использования в качестве рабочей аналитической системы, поскольку такие компании заинтересованы в оперативном анализе деятельности на коротких интервалах времени, редко превышающих 1-1,5 года, объемы данных за такие периоды не представляют трудностей для интегрированной системы.

Таким образом, виртуальное моделирование позволяет эффективно решать задачи пилотно-проектирования аналитических СППР, в частности, для оперативно-тактического уровня производственных систем.

#### 4.3. Уровень стратегических решений

В процессе перехода России к рыночной экономике наибольшее падение испытали почти все отрасли промышленного производства – машиностроение, станкостроение, электронная промышленность, приборостроение и др. В значительной степени это связано с тем, что в жестких условиях рынка российские промышленные товары, в отличие от сырьевых товаров, не смогли составить конкуренцию потоку более высококачественных товаров со всего мира. Технологическое отставание от передовых индустриальных стран оказалось столь глубоким, что преодолеть его можно было бы только ценой огромного объема инвестиций в промышленность, превышающего в два-три раза ВВП страны. Ясно, что инвестиции такого уровня в стране отсутствовали. В результате российские промышленные предприятия были поставлены перед тяжелым стратегическим выбором – либо постепенно сворачивать свою деятельность, либо искать способ адаптации к условиям рыночной экономики.

В 1990-е годы авторы статьи провели цикл исследований в области технологического трансфера – направления, связанного с переносом

передовых технологических достижений и инноваций из одних стран в другие, либо из одних отраслей в другие, либо от одних компаний к другим компаниям. Стратегия технологического трансфера широко используется в мировой практике для преодоления кризисных состояний в промышленности и экономике. Поскольку до перехода к рыночной экономике Россия не использовала стратегию международного технологического трансфера (существовал лишь внутриотраслевой), то практика и теория этого трансфера отсутствовали до недавнего времени в нашей стране. Результаты исследований в данном направлении в обобщенном виде были представлены во времена финансового кризиса 1998 года на уровне принятия стратегических решений в стране и оказались полезными для повышения внимания к стратегии технологического трансфера как к эффективной альтернативной стратегии преодоления кризисного состояния в экономике по сравнению с главными стратегиями, на которые возлагались надежды в тот период – это сырьевая стратегия и стратегия конверсии предприятий оборонных отраслей промышленности. На рубеже XX и XXI веков началось применение новой стратегии технологического трансфера в ряде отраслей промышленности – автомобильной, бытовой электроники, пищевой, связи и коммуникации, производстве строительных материалов и др. Наибольшего успеха добилась автомобильная промышленность, где к трансферу современной технологии автомобильного производства подключились почти все лидеры мирового автостроения - Ford, General Motors, Renault, Toyota, Volkswagen, Nissan, Hyundai, KIA.

В упомянутых выше исследованиях авторов настоящей статьи большое внимание уделено изучению с помощью виртуального моделирования и математического аппарата логистических дифференциальных уравнений процессов распространения технологического трансфера. Исследование фундаментальных проблем переноса технологии становится все более актуальным по мере расширяющегося применения этого подхода в отраслях российской экономики. Успешное развитие процесса переноса технологии зависит от большого числа факторов, включая технические, технологические, эко-

номические, юридические и даже политические. Из-за сложного взаимодействия этих факторов не все проекты переноса технологии достигают своих целей. Примеры неудачной реализации имеются и в автомобильной промышленности, несмотря на то, что в целом процесс технологического трансфера в этой отрасли развивается успешно.

В настоящей статье представлена базовая математическая модель технологического трансфера, используемая при исследовании и моделировании процесса распространения новой технологии.

Процесс переноса технологии описывается следующей логистической дифференциальной моделью

$$\dot{x} = p x N^{-1} (N - x), \quad (3)$$

где  $x = x(t)$  – число участников технологического трансфера в момент времени  $t \geq 0$ ;

$N$  – общее число реципиентов переносимой производственной технологии;

$p$  ( $p > 0$ ) – коэффициент роста участников трансфера.

С помощью этой модели в работе [21] проведен анализ динамики роста или затухания процесса трансфера на любых конечных интервалах времени с учетом ограничений, наложенных на уровень инвестиционных ресурсов. Основными параметрами модели (3) являются коэффициент роста  $p$ , число участников  $N$  и начальное значение  $x(0)$ . Согласованное изменение этих параметров позволяет управлять числом производителей, вовлекаемых в процесс трансфера. На базе выявленных свойств модели (3) были предложены способы реализации механизмов управляемого изменения числа участников трансфера для классов задач переноса с разложимыми технологиями и корпоративным объединением участников рынка.

Модель (3) хорошо описывает процесс распространения технологии при отсутствии возмущений. Но в реальных задачах процесс распространения порождает также и процесс отторжения в результате действия разнообразных возмущений, например, влияния конкуренции, ошибочного выбора технологии, недостаточного учета специфических условий внедрения технологии и т.п.

Учет возмущений осуществляется с помощью дифференциальной модели трансфера типа Вольтера-Костицина с дихотомией множества реципиентов переносимой технологии  $N$  на подмножества внедряющих и отторгающих производителей:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= p x N^{-1} (N - x - y), \\ \dot{y} &= \gamma x y - \varepsilon y, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $y = y(t)$  – число участников трансфера, отторгающих в момент времени  $t \geq 0$  переносимую технологию,

$\gamma$  ( $\gamma > 0$ ) – коэффициент роста числа отторгающих производителей,

$\varepsilon$  ( $\varepsilon > 0$ ) – коэффициент замедления роста числа отторгающих производителей.

Модель типа (4) более адекватно отражает воздействие различных возмущающих факторов на динамику предельных характеристик взаимодействия процессов распространения и отторжения технологии. Эта модель подробно исследована в [22]. Сформулируем основные результаты исследования свойств решений модели (4) в виде следующей теоремы.

### Теорема

Для модели (4) справедливы следующие утверждения:

1. модель (4) имеет нетривиальное состояние равновесия (особую точку)

$$z_0 \equiv (x_0, y_0)^T,$$

лежащую в положительном квадранте фазовой плоскости, тогда и только тогда, когда коэффициенты модели (4) связаны неравенством  $\varepsilon \gamma^{-1} < N$ , (5)

при этом координаты особой точки задаются равенствами

$$x_0 = \varepsilon \gamma^{-1}; \quad y_0 = N (1 - \varepsilon \gamma^{-1} N^{-1});$$

2. при выполнении неравенства  $\varepsilon \sigma^2 < 4 \gamma (p \gamma - \varepsilon \sigma)$ , (6)

$$\text{где } \sigma \equiv p N^{-1},$$

дифференциальная модель (4) имеет грубую нетривиальную особую точку – устойчивый фокус, а численности  $x(t)$ ,  $y(t)$  совершают во времени затухающие колебания;

3. если параметры модели (4) изменяются таким образом, что условие (6) превращается в равенство, то особая точка  $z^0$  будет лежать на границе устойчивых фокусов и узлов;

4. при изменении знака неравенства (6) на обратный в модели (4) происходит бифуркация – особая точка становится устойчивым узлом.

Теорема определяет зависимость динамики развития и взаимовлияния процессов распространения и отторжения переносимой технологии от изменения параметров модели (4). В частности, анализ модели (4) выявил интересное свойство: предельная численность производителей, внедряющих новую технологию, преимущественно зависит от параметров процесса отторжения технологии.

## Заключение

Таким образом, в статье рассмотрен новый подход к виртуальному моделированию, который ставит виртуальные компьютерные модели в промежуточное положение между математическими моделями и моделируемыми физическими объектами. Введено понятие транспозиционной виртуальной модели для описания процесса замещения физических объектов компьютерными моделями. При таком подходе к ключевым критериям математических моделей – адекватности и грубости – добавляется новое фундаментальное свойство транспозиционных виртуальных моделей – способность к *частичному, полному или превосходящему замещению* физической реальности компьютерными моделями. Исследуются свойства адекватности виртуальных моделей и связанных с ними условий возникновения эффекта замещения. С системных позиций рассмотрены проблемы построения транспозиционных виртуальных моделей для исследования и проектирования современных сложных компьютерно-интегрированных производств на разных уровнях структуры их управления.

## Литература

- <http://www.mssoftware.com>
- Литваков Б.М. Аппроксимация функций выбора. // Автоматика и телемеханика, 1984, №9, с.138-146
- Юдин Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений. –М.: Наука, 1989.
- Молодцов Д.А. Устойчивость принципов оптимальности. –М.: Наука, 1987.
- Былов Б.Ф. и др. Теория показателей Ляпунова и ее приложения к вопросам устойчивости. – М.: Наука, 1966.
- Розенвассер Е.Н. Показатели Ляпунова в теории линейных систем управления. – М.: Наука, 1977.
- Матросов В.М. и др. Метод сравнения в математической теории систем. – Новосибирск: Наука, 1980.
- Воронов А.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985.
- Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Физматгиз, 1963.
- Краснощечков П.С., Петров А.А., Федоров В.В. Информатика и проектирование. –М.: Знание, 1986.
- Вязгин В.А., Федоров В.В. Математические методы автоматизированного проектирования. – М.: Высшая школа, 1989.
- Ахрем А.А., Рахманкулов В.З. Виртуальное проектирование и принятие решений // Автоматизация проектирования, 1997, №4, с.20-30.
- Изобов Н.А. Линейные системы обыкновенных дифференциальных уравнений // В кн.: Итоги науки и техники. Математический анализ. – М.: ВИНТИ, 1974, с.71-146.
- Миллионщиков В.М. Грубые свойства линейных систем дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения, 1969, т.5, №10, с.1775-1784.
- Макаров И.М., Ахрем А.А., Рахманкулов В.З. О некоторых математических задачах общей теории проектирования сложных технических систем // В сб. трудов ИСА РАН «Управление информационными потоками». –М.: Эдиториал УРСС, 2002, с.236-245.
- Миллионщиков В.М. Системы с интегральной разделенностью всюду плотны во множестве всех линейных систем дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения, 1969, т.5, №7, с.1167-1170.
- Рахманкулов В.З., Переслени С.А., Храмов Ю.Е. Программное обеспечение системы графического программирования роботов АПРОГРАФ // В сб. «Программное обеспечение промышленных роботов» . – М.: Наука, 1986, с.238-247.
- Рахманкулов В.З., Переслени С.А. Система графического программирования роботов – АПРОГРАФ // В сб. «Робот. Компьютер. Гибкое производство». – М.: Наука, 1990, с.37-53.
- Федоров А., Елманова Н. Введение в OLAP-технологии Microsoft. – М.: Диалог МИФИ, 2002.
- Барсегян А.А. и др. Методы и модели анализа данных: OLAP- и Data Mining. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004.
- Макаров И.М., Рахманкулов В.З., Ахрем А.А. Логистические дифференциальные модели технологического переноса // В кн.: Нелинейная динамика и управление. – М.: Эдиториал УРСС, 1999, с. 143-149.
- Ахрем А.А., Рахманкулов В.З. Многомерные дифференциальные модели процесса технологического трансфера // В кн.: Нелинейная динамика и управление. Вып. 1. – М.: Физматлит, 2001, с. 417-421.

**Макаров Игорь Михайлович.** Родился в 1927 году. Окончил МАИ в 1950 году. Доктор технических наук, профессор, академик РАН. Автор более 200 научных работ. Специалист в области гибкой автоматизации производства, интеллектуальной робототехники, теории управления, системного анализа, математического моделирования. Советник Президиума РАН.

**Рахманкулов Виль Закирович.** Родился в 1937 году. Окончил МАИ в 1960 году. Доктор технических наук, профессор. Автор более 130 научных работ. Специалист в области гибкой автоматизации производства, интеллектуальной робототехники, теории управления, системного анализа, математического моделирования. Заведующий лабораторией Института системного анализа РАН.

**Ахрем Андрей Афанасьевич.** Родился в 1956 году. Окончил МГУ в 1977 году. Кандидат физико-математических наук. Автор более 70 научных публикаций. Специалист в области математической теории систем, математического моделирования сложных компьютерно-интегрированных производств. Старший научный сотрудник Института системного анализа РАН.