

# ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОПТИМИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Г. М. Антонова, А. Д. Цвиркун

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва

Рассмотрены история развития и современное состояние компьютерного моделирования крупномасштабных систем. Указаны проблемы построения современных метамоделей и перспективы их решения с целью повышения эффективности функционирования моделируемых объектов.

## ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая вниманию читателей статья посвящена описанию современных имитационных моделей сложных производственных систем и преследует цель отразить существующие достижения, успехи и привлечь внимание к возможностям методов моделирования в направлении повышения эффективности функционирования крупных производственных объектов. В современных исследованиях термин моделирование имеет разнообразные трактовки. Физическое или аналоговое *моделирование* предполагает создание аналога рассматриваемой системы путём изменения масштаба представления или перехода к другой предметной области, в которой действуют аналогичные закономерности и которая изучена в большей степени. Математическое моделирование состоит в создании аппарата для описания и исследования структуры и поведения объекта, причём достаточно часто считают естественным тот факт, что математическое моделирование завершается созданием алгоритмов расчёта характеристик объекта и программ, реализующих эти алгоритмы на современных ЭВМ. Более конкретный смысл вкладывается в название компьютерное или машинное моделирование, под которым понимается создание такой модели объекта, которая обязательно требует реализации в виде программы для ЭВМ. В дальнейшем будет использоваться такое толкование названия *имитационное статистическое моделирование*, которое предполагает наличие элементов имитации функционирования реального объекта, реализацию модели в виде компьютерной программы и многократное повторение прогонов программы для учёта воздействия помех, характерных для реальной действительности.

## 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Можно выделить три этапа развития методов имитационного статистического моделирования.

*Первый этап* начался почти одновременно с созданием и расширением применения ЭВМ и включал в себя формирование в различных предметных областях постановок задач, решаемых путём имитационного статистического моделирования, первые применения идей планирования имитационных экспериментов на ЭВМ, первые попытки оптимизации структуры и функционирования объектов с использованием результатов имитационного моделирования. Этот этап завершился с созданием специализированных языков моделирования типа GASP, GPSS и т. п. Кроме того, появилась технология моделирования, разделяющая процесс создания и использования моделирующей программы на ряд типовых этапов. Эти этапы охватывают создание концептуальной модели, формализацию описания и создание математической модели, выбор и разработку алгоритмов моделирования, выбор языка программирования, кодирование согласно выбранному алгоритму и языку программирования, проверку адекватности построенной имитационной статистической модели, планирование экспериментов с моделью, проведение имитационных экспериментов, анализ полученных результатов и формирование выводов или коррекцию модели для повторного исследования.

Несмотря на существование многочисленных методов и приёмов формализации описания разнообразных объектов, известно всего две технологии создания алгоритмов для имитационного статистического моделиро-

вания. Первая описывает процесс функционирования объекта во времени по шагам, разбивая временную ось на фиксированные интервалы времени, — *метод фиксированного шага*, а вторая меняет параметры модели скачкообразно от события к событию — *метод модельных событий*.

*Второй этап* продолжался примерно с середины 1970-х до середины 1980-х гг. Он характеризовался интенсивным внедрением приёмов и методов компьютерного моделирования во все сферы производственной деятельности. Это совпало со стремительным расширением применения ЭВМ и развитием специализированных языков моделирования. Завершился этот этап попытками построения моделирующих комплексов, созданием универсальных систем моделирования и появлением универсальных языков, одним из примеров которого стал развивающийся и в настоящее время язык UML.

*Третий этап* можно связать с развитием идей оптимизационно-имитационного моделирования. Появление персональных компьютеров сделало вычислительную технику широко доступной. Имитационные эксперименты перестали восприниматься как экзотический метод исследования. В результате перехода количественных изменений в качественные были созданы новые методологии обработки значительных объёмов имитационных экспериментов. Эти методологии позволили получить приближённые решения многих сложных оптимизационных задач.

## 2. РАЗВИТИЕ ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОГО ПОДХОДА

Рассмотрим примеры работ, позволивших создать современную идеологию оптимизационно-имитационного подхода. Одной из первых появилась работа [1]. В ней поставлена задача создания алгоритмов, позволяющих использовать возможности ЦВМ для поиска решения задач математического анализа, в которых необходимо установить связь между вероятностными характеристиками различных случайных процессов или математическими ожиданиями случайных величин и зависящими от них значениями интегралов, решениями дифференциальных уравнений и т. п. Такие алгоритмы основываются на методе Монте-Карло и идее, высказанной в работе [2] о том, что для решения аналитической задачи возможно моделировать случайный процесс, а затем конструировать необходимое решение с помощью статистических оценок вероятностей или математических ожиданий.

В книге [1] и последовавших за ней работах [3–5] намечены основные прикладные задачи, для решения которых можно применять метод статистических испытаний.

Это задачи совершенствования производства в энергетике, на транспорте, в машиностроении, в сетях связи и других областях. Метод статистических испытаний применяется для исследования функционирования отдельных элементов, структуры системы в целом, взаимодействия системы с внешней средой, влияния на неё внутренних помех и возмущений во внешней среде. Широко применяется для оценки эффективности, надёжности, качества планирования, учёта и др.

Применение имитационных моделей для решения экстремальных задач началось одновременно с внедре-

нием вычислительной техники в практику исследования производственных систем. Первые работы [6–8] связаны с простым перебором значений параметров для определения наилучших значений функционалов, представленных имитационными статистическими моделями. Из этих первых попыток были сделаны выводы о том, что хотя задача поиска улучшенных значений функционалов подобным методом разрешима в принципе, необходимо приложить значительные усилия для правильной организации перебора. По этой причине такой метод можно считать эффективным для имитационных моделей таких объектов, для которых характерно:

- отсутствие адекватного аналитического описания критериев качества;
- неоднозначность отображения пространства параметров в пространство критериев качества в связи со стохастическим характером исследуемой системы;
- невозможность применения аналитических методов поиска экстремума.

При высокой степени сложности производственной системы со значительным числом варьируемых параметров многократное повторение циклов моделирования, анализа, оценки полученных данных и корректировки параметров не только занимает длительное время, но и не всегда приводит к удовлетворительным результатам. Строго обосновать утверждение об отсутствии возможности улучшения полученного решения обычно невозможно. Если улучшение достигнуто, трудно определить момент завершения исследования. Всегда возможно, что при небольших затратах труда и времени удастся получить значительное увеличение качества функционирования системы. В связи с этим возникает задача построения математически обоснованных процедур целенаправленного перебора вариантов при поиске экстремума функционалов, представленных имитационной статистической моделью [9].

## 3. ВАРИАНТЫ ПОСТАНОВОК ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Представим задачу оптимизации производственной системы, характеризуемой вектором параметров  $\alpha$  и критерием эффективности  $F(\alpha)$  как поиск такой структуры системы и значений параметров  $\alpha$ , при которых достигается

$$\text{extr} F(\alpha)$$

при ограничениях

$$f_i(\alpha) \leq 0, \quad i \in I; \quad (1)$$

$$f_j(\alpha) \leq 0, \quad j \in J. \quad (2)$$

Набор ограничений (1) имеет форму математических выражений, а набор ограничений (2) — форму алгоритмических выражений. Выполнение этих ограничений можно проверить только по результатам имитационного моделирования. Функционал экстремальной задачи  $F(\alpha)$  также может быть задан в алгоритмической форме.

Предположим, что выбраны варианты производственной системы и проверены оба вида ограничений. Обозначим множество допустимых вариантов производственных систем по ограничениям типа (1) как  $I_0$ , а множество допустимых вариантов производственных сис-



тем по ограничениям типа (2) как  $J_0$ . Модели задач синтеза могут быть разбиты на следующие семь классов:

целевая функция задана в аналитической форме, допустимые варианты выбраны из пространства:

- 1)  $I_0$ ;
- 2)  $J_0$ ;
- 3)  $I_0 \cap J_0$ ;

целевая функция задана в алгоритмической форме, допустимые варианты выбраны из пространства:

- 4)  $I_0$ ;
- 5)  $J_0$ ;
- 6)  $I_0 \cap J_0$ ;

7) значительное число задач формулируется в многокритериальной постановке; для них необходимо определить такую структуру системы и значения параметров  $\alpha$ , при которых достигаются экстремальные значения для множества критериев

$$F_l(\alpha), \quad l = \overline{1, L}$$

при ограничениях

$$f_{li}(\alpha) \leq 0, \quad i \in I_l;$$

$$f_{lj}(\alpha) \leq 0, \quad j \in J_l.$$

Чаще всего решение в виде отдельного варианта в такой форме недостижимо и трансформируется в требование выделить совокупность вариантов, составляющих множество Парето, из которого после дополнительного отбора с учётом интегрального критерия или каких-либо внешних условий отбирается окончательное решение. Процедуры решения многокритериальной задачи значительно сложнее, чем процедуры решения однокритериальных задач.

*Первая модель*, для которой критерии качества и ограничения заданы в аналитической форме, используется для решения задач с высокой степенью формализации описания. Эти задачи решаются методами математического программирования и возникают при исследовании таких аспектов производственных и экономических систем, которые позволяют не учитывать стохастический характер параметров системы, внутренних и внешних помех.

Процедуры синтеза оптимального варианта структуры включают в себя построение имитационной модели, оптимизацию, анализ полученных результатов и могут повторяться в процессе уточнения описания системы по результатам проводимого анализа.

*Вторая модель* предполагает наличие целевой функции, заданной в аналитической форме, и ограничений, заданных в алгоритмической форме. Задачи, представленные в таком виде, из-за плохо формализованных ограничений требуют обязательного создания имитационной модели. При синтезе оптимальной структуры или поиске оптимальных значений параметров необходимо выполнить большое число имитационных экспериментов. Для сокращения трудоёмкости процедур оптимизации можно применить методы планирования эксперимента и методы направленного имитационного моделирования. Процедуры синтеза включают в себя этапы создания имитационной модели, проведения имитационных экспериментов, анализа, поиска оптимального

решения и корректировки имитационной модели с последующим повторением этапов оптимизации для формирования окончательного решения.

Для решения задач оптимизации больших экономических и промышленных систем, функционирование которых жёстко регламентировано, возможно применение последовательного анализа результатов имитационного моделирования для проверки выполнения наложенных на целевую функцию алгоритмических ограничений и выбора оптимального варианта структуры или оптимальных значений параметров среди тех, которые удовлетворили поставленным ограничениям.

Для задач с аналитически заданной целевой функцией и ограничениями, представленными в алгоритмической форме, имеющих стохастические параметры, применяются оптимизационно-имитационные процедуры [9, 10] синтеза структуры и выбора параметров. Можно применять ЛП<sub>τ</sub>-поиск с усреднением. Такие методы содержат этапы реализации человеко-машинных процедур для организации диалога конструктора системы с пакетом прикладных программ и использования в процессе решения неформальных процедур выбора на основе интуиции и предшествующего опыта конструирования и эксплуатации образцов системы, аналогичных исследуемой.

*Третья модель* используется для описания задач с целевой функцией, заданной в аналитической форме, и ограничениями смешанного характера, как аналитическими, так и алгоритмическими. Для решения таких задач создаются специальные процедуры обработки результатов имитационного моделирования. Один из вариантов процедуры состоит в проверке по результатам имитационного моделирования аналитических ограничений, выборе вариантов структуры и значений параметров, а затем проверке алгоритмических ограничений для найденных вариантов. Это сокращает объём имитационных экспериментов. Если удовлетворительный вариант определяется сразу, процедура заканчивается. В противном случае выполняются корректировка имитационной модели, проверка аналитических ограничений, выбор, проверка алгоритмических ограничений, анализ, т. е. несколько итераций до тех пор, пока не удастся найти рациональный вариант структуры или значения параметров.

*Четвёртая модель* описывает задачи, в которых целевая функция задана в алгоритмическом виде, а ограничения имеют аналитическое представление. Значения целевой функции рассчитываются с помощью имитационной модели, поиск рационального варианта структуры или значений параметров требует большого числа имитационных экспериментов. Область допустимых значений параметров модели определяется достаточно быстро путём проверки аналитических ограничений. Для решения задач такого характера применяются методы имитационного моделирования, планирования имитационных экспериментов, направленное имитационное моделирование и оптимизационно-имитационные методы.

*Пятая модель* описывает плохо формализованные задачи, для которых практически отсутствует аналитическое описание. Они требуют создания сложных имитационных моделей, проведения длительных имитационных

экспериментов. Для них оптимизационно-имитационные методы обязательно должны сочетаться с планированием имитационных экспериментов для уменьшения трудоёмкости поиска рационального варианта структуры или рациональных значений параметров. Направленное имитационное моделирование также позволит достичь решения в приемлемые сроки. Значительное ускорение поиска может дать применение ЛП<sub>τ</sub>-поиска с усреднением.

*Шестая модель* описывает плохо формализованные задачи, однако часть ограничений у них представлена в аналитическом виде. Эти задачи требуют создания сложных имитационных моделей. Для поиска рациональных вариантов структуры или значений параметров необходимо применять методы имитационного моделирования, планирования имитационных экспериментов, направленное имитационное моделирование и оптимизационно-имитационные методы, включая ЛП<sub>τ</sub>-поиск с усреднением.

Рассмотренные варианты задач и методы, предлагаемые для их решения, показаны в таблице.

#### 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

В качестве примера применения оптимизационно-имитационных методов можно привести задачу выбора функциональной структуры пункта управления,

имеющего минимальную стоимость оснащения необходимыми техническими средствами [9]. Пункт управления обрабатывает множество потоков функциональных задач. Предполагается, что каждый поток задач может обрабатываться только одним средством, загрузка которого ограничена. Для описания процесса решения задач используется модель системы массового обслуживания. Известны интенсивности поступления задач  $\lambda_k$  для каждого потока, интенсивности обработки  $j$ -м средством управления задач  $k$ -го потока  $\mu_{kj}$ . Заданы затраты на обработку  $k$ -го потока задач  $j$ -м средством управления  $c_{kj}$ . Критерий эффективности определяет суммарную стоимость обработки задач в пункте управления, например,

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J} c_{kj} x_{kj} \rightarrow \min,$$

где  $x_{kj} = 1$ , если  $k$ -й поток задач обрабатывается  $j$ -м средством управления, и  $x_{kj} = 0$  в противном случае.

Ограничения содержат требования выполнения условий

$$\sum_{j \in J} x_{kj} = 1, \quad k \in K;$$

$$\psi_j(\bar{X}, N_k, G_k, P_k) \leq \psi_j^{\text{доп}};$$

$$T_k(\bar{X}, N_k, G_k, P_k) \leq T_k^{\text{доп}}.$$

Параметр  $\bar{X}$  обозначает вариант функциональной структуры,  $N_k$  — число задач  $k$ -го потока, поступающих

#### Разновидности задач оптимизации сложных производственных систем и методы их решения

Модели	Задачи	Методы
1	Аналитический критерий качества и аналитические ограничения	Математическое программирование. Имитационное моделирование
2	Аналитический критерий качества и алгоритмические ограничения:  малое число вариантов  стохастические параметры	Имитационное моделирование. Планирование имитационных экспериментов. Направленное имитационное моделирование. Специальные процедуры. Последовательный анализ результатов имитационного моделирования (перебор). Специальные процедуры. Оптимизационно-имитационные методы ЛП <sub>τ</sub> -поиск с усреднением. Специальные процедуры
3	Аналитический критерий качества, аналитические и алгоритмические ограничения	Оптимизационно-имитационные методы. Специальные процедуры
4	Алгоритмическая форма критерия качества и аналитические ограничения	Имитационное моделирование. Планирование имитационных экспериментов. Направленное имитационное моделирование. Оптимизационно-имитационные методы
5	Алгоритмическая форма критерия качества и алгоритмические ограничения	Имитационное моделирование. Планирование имитационных экспериментов. Направленное имитационное моделирование. Оптимизационно-имитационные методы, ЛП <sub>τ</sub> -поиск с усреднением
6	Алгоритмическая форма критерия качества, алгоритмические и аналитические ограничения	Имитационное моделирование. Планирование имитационных экспериментов. Направленное имитационное моделирование. Оптимизационно-имитационные методы, ЛП <sub>τ</sub> -поиск с усреднением
7	Многокритериальная постановка задачи	Оптимизационно-имитационные методы. ЛП <sub>τ</sub> -поиск с усреднением. Специальные процедуры



на обработку за выбранный период,  $G_k$  — график поступления задач  $k$ -го потока на обработку,  $P_k$  — программу обработки задач  $k$ -го потока,  $\psi_j$  — загрузка  $j$ -го средства управления,  $\psi_j^{\text{доп}}$  — её предельное допустимое значение,  $T_k$  — продолжительность обработки задачи  $k$ -го потока,  $T_j^{\text{доп}}$  — её предельное допустимое значение.

Первое ограничение определяет необходимость распределения каждого потока задач только на одно средство управления, второе устанавливает загрузку для каждого средства управления, а третье определяет возможную продолжительность пребывания задач управления в пункте управления.

В рассмотренном примере заданы три средства управления и четыре потока задач. Для проверки выполнения алгоритмических ограничений предполагается, что пункт управления описывается как одноканальная разомкнутая система массового обслуживания с ожиданием. Обслуживаются  $k$  простейших взаимно независимых потоков. Суммарные потоки, поступающие на каждый прибор, также близки к простейшим. Полученное решение определяет порядок загрузки средств управления. Из возможных 81-го варианта загрузки просмотрены только 11; таким образом, необходимое число прогонов имитационной модели существенно сократилось.

Для решения задач, описываемых моделями седьмого типа, создаются специальные процедуры и разрабатываются специальные программные средства. В работах [10, 11] рассмотрены примеры решения многокритериальной многопараметрической задачи оптимизации стохастической системы по набору критериев неполного среднего, имеющих вид:

$$K_j = \int_0^\infty \int_G \int_\Omega f_j(\alpha(t), \omega) w_G(\alpha(t), \omega) d\omega d\alpha dt, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

где  $K_j, j = \overline{1, J}$  — набор показателей качества на выходе системы,  $G$  — определяемая в процессе поиска область эффективности,  $\Omega$  — область изменения значений стохастических параметров,  $f_j(\alpha(t), \omega)$  — функция, описывающая  $j$ -й показатель качества,  $\alpha(t)$  — вектор входных параметров размерности  $n_1$ ,  $\omega$  — вектор случайных внешних и внутренних воздействий (помех) размерности  $n_2$ ,  $t$  — время,  $J$  — общее число критериев,  $w_G(\alpha, \omega) = w(\alpha, \omega) / \int_G \int_\Omega w(\alpha, \omega) d\omega d\alpha$  — плотность распределения, нормированная относительно области  $G$ ,

$w(\alpha, \omega)$  — плотность распределения, удовлетворяющая условию:

$$\int_{-\infty}^\infty \int_\Omega w(\alpha, \omega) d\omega d\alpha = 1.$$

Необходимо найти область евклидова пространства  $G$ , в которой достигается совместный экстремум показателей качества (3) в смысле решения многокритериальной задачи. Другими словами, необходимо построить оценку области эффективности, в которой выполняются условия

$$K_j(G) \geq K_{jz}, \quad j = \overline{1, q}, \\ K_j(G) \leq K_{jz}, \quad j = \overline{q+1, J},$$

или набор оценок из пространства оценок с заданной метрикой [10], для которых показатели качества составляют множество Парето. В области интегрирования  $G$ , названной областью эффективности, усреднённые значения показателей качества должны быть лучше, чем в других областях.

Предлагаемая в работах [10, 11] процедура решения завершается выбором по результатам имитационного моделирования окончательной оценки области эффективности из серии оценок  $G_1, G_2, \dots, G_j, \dots, G_l$ , полученной в результате имитационных экспериментов. Каждой оценке согласно алгоритму ЛП $_{\tau}$ -поиска с усреднением [10, 11] соответствует своя подпоследовательность точек проведения имитационного эксперимента  $L_{G_i}$ .

Путём просмотра и анализа результатов имитационных экспериментов можно подготовить описания областей эффективности в виде многомерных параллелепипедов

$$\alpha_{i\min} \leq \alpha_{is} \leq \alpha_{i\max}, \quad s = \overline{1, n_1}, \quad i = \overline{1, l},$$

где  $\alpha_{i\min}, i = \overline{1, l}$  — минимальные значения координат входных параметров  $\alpha$ ,  $\alpha_{i\max}, i = \overline{1, l}$  — максимальные значения координат входных параметров  $\alpha$ . Иногда удается найти набор функций  $r_{G_i}(\alpha)$ , соответствующих определённой подпоследовательности и связанной с ней оценке. Например, для оценки  $G_i$

$$r_{\min G_i} \leq r_{G_i}(\alpha) \leq r_{\max G_i}.$$

Если функции подобрать не удаётся, оценки области эффективности можно представить последовательностью правил. Для первой оценки — правило 1, для второй — правило 2, ..., для  $i$ -й оценки — правило  $i$  и т. д.

Если исследуемая стохастическая система изучена достаточно подробно, иногда удаётся найти эмпирический индикатор или решающее правило для отбора точек, принадлежащих области эффективности.

Модели типа 5—7 обычно описывают крупномасштабные объекты и сопровождаются разработками специальных методов исследования и приближённого решения оптимизационных задач, возникающих при функционировании исследуемых систем. Можно привести несколько примеров таких моделей, доведенных до практической реализации.

## 5. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

В работах [12—16] приведен пример эколого-социально-экономической имитационной модели для воспроизведения демографической, экономической, экологической и социальной обстановки в течение времени жизни одного поколения. Для повышения адекватности модели предлагается применить концепцию распределённых вычислений через Интернет. Модель имеет многокомпонентный характер и учитывает в составе иерархии моделей сверху вниз сначала группы, затем подгруппы и далее объекты. Например, группа “страна” включает в себя объекты: правительство; демография; экология; добывающие отрасли экономики; образова-





**Рис. 1. Схема формирования инвестиционных проектов с помощью имитационного моделирования (оптимизационно-имитационный подход)**

ние; здравоохранение; информатика; наука; домашнее хозяйство как экономический агент.

В работе [12] вводится термин *информационно-алгоритмические ресурсы*, который обозначает разнообразную информацию, связанную с объектом моделирования и хранящуюся в электронной форме, а также программные комплексы, необходимые для определения прогностических характеристик имитационных моделей. Для доступа к таким информационным ресурсам необходима специальная технология, основанная на распределённых вычислениях [17, 18].

Эколого-социально-экономическая модель используется для решения проблем обеспечения устойчивого развития России. Она описывает различные аспекты экономических, демографических, социальных и экологических процессов в масштабах всей России, опираясь на средства распределённых вычислений. Модель учитывает динамику развития и позволяет решать многочисленные задачи, например, задачи оптимизации инвестиций при ограничениях на уровень безработицы и другие экономические характеристики.

Пример имитационной экономико-математической модели для решения задач оптимизации топливно-энергетического баланса, развития электроэнергетических и трубопроводных систем рассматривается в работах [19–20]. Модель предназначена для исследования связей энергетики с другими отраслями промышленности, для прогнозирования уровней энергопотребления и энергосбережения и для решения других задач. Практическая реализация модели связана с задачами анализа состояния и прогнозирования условий долгосрочного развития Северо-Запада России, в частности, Мурманской области.

Для решения поставленных задач реализован описанный в работе [21] имитационный метод статистической аппроксимации, опирающийся на диалоговый режим сопряжения различных этапов имитационных исследований и специальным образом ориентированный комплекс вероятностных моделей и статистических методов. Имитационно-статистическая аппроксимация позволяет внести существенный вклад в создание аппарата исследования производственных систем в условиях неполноты исходной информации.

Для описания металлургического производства используются различные варианты моделей 5–7. В работах [22–25] приведены примеры построения таких моделей. Создана специальная методика построения имитационных моделей, в наибольшей степени отвечающая непрерывно-дискретному характеру составных элементов металлургического производства [24]. Она основана на принципе “вложенных задач и моделей с идентификацией”. Отдельные объекты в составе металлургического производства рассматриваются как автоматизированные технологические комплексы. При выборе алгоритмов моделирования учитываются технологическая, организационная и управляющая структуры. Из множества технологических и организационных решений выделяют отдельные подмножества, связанные с задачей исследования. Имитационное моделирование применяется при выборе инвестиционных проектов по схеме, приведённой в работе [24] и представленной на рис. 1.

Предложенная методика имитационного моделирования и оптимизационно-имитационный подход в выборе вариантов составных элементов металлургического производства и варианта проекта в целом нашли применение при создании Исфаганского металлургического завода (Иран), Алапаевского металлургического завода (Россия), Карагандинского металлургического завода (Испат — Кармет, Казахстан) и др.

## 6. МАКРОЯЗЫКИ В ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

Специальные имитационные языки повысили эффективность программирования при создании имитационных моделей. Концептуальный аппарат языка облегчает описание функционирования моделируемой системы и подготовку структуры и состава программных модулей. Широко используются стандартные функции языка. Методологические подходы базируются на непрерывной, сетевой, дискретной, дискретно-событийной и комбинированной формах имитации. При непрерывной имитации зависимые переменные модели изменяются непрерывно в течение имитационного времени. Примером подобного описания моделируемой системы может служить описание концентрации реагента в химическом процессе или положения и скорости движения объекта в транспортной системе. При дискретной имитации зависимые переменные изменяются в моменты свершения событий, причём время как независимая переменная может иметь как непрерывный, так и дискретный характер. При комбинированной имитации время изменяется или дискретно, или непрерывно, а зависимые переменные могут изменяться непрерывно, дискретно или непрерывно с наложенными дискретными скачками.

Применение макроязыков для моделирования сложных крупномасштабных объектов позволило создать многочисленные алгоритмы, пригодные для построения моделей производственных систем. Ряд примеров алгоритмов и описаний разнообразных производственных ситуаций приведен в работах [26, 27]. Среди них можно назвать в первую очередь алгоритмы моделирования систем массового обслуживания. Это, в частности, сетевая модель банка с несколькими кассирами и общей очередью, сетевая модель поточной линии, модель производственной линии с пунктами технического контроля и настройки, сетевая модель автогрузовых перевозок



(4 компонента), сетевая модель работы карьера (2 компонента), модель загрузки танкеров в порту, модель работы станка с полками, модель участка дороги с односторонним движением для определения длительности включения зелёного сигнала светофора, минимизирующей среднее время ожидания для всех автомобилей.

В работе [28] приведен пример модели системы управления запасами с неудовлетворённым спросом. Этот алгоритм можно применить для исследования работы крупного магазина. По результатам имитационных экспериментов можно получить статистические данные о состоянии запаса товаров, о наличии определённого товара, о резервном запасе товара в момент получения заказа, о числе продаж, о времени между несостоявшимися продажами и др.

При сетевом моделировании объект представляется в виде множества движущихся компонентов, последовательно проходящих по узлам, содержащим ресурсы сети. Предполагается, что изменение состояния системы происходит только в момент поступления какого-либо компонента в узел.

Главная цель построения имитационной модели сложной социально-экономической системы — выбор методов улучшения функционирования. Адекватная имитационная модель выявит узкие места, позволит найти эффективные алгоритмы управления, эффективные режимы функционирования агрегатов, производственных линий, транспортных средств и другого дорогостоящего оборудования. На имитационной модели можно реализовать различные варианты организации управления, сравнить их между собой и выбрать наиболее выгодный.

Логистические системы включают в себя элементы для реализации разнообразных функций управления: обмен информацией внутри системы и с внешней средой; обработка и распределение заказов; снабжение; управление запасами; управление грузоперевозками, грузопереработкой, складированием и т. д. Имитационные модели таких систем исключительно сложные. Для их построения применяются языки моделирования разных уровней. Число модулей в пакетах прикладных программ для моделирования достигает нескольких сотен. Возникает необходимость разработки специальных средств анализа сложных имитационных моделей — средств мета-моделирования. Такой подход позволяет манипулировать с моделями сложных систем, провести валидацию, улучшить алгоритм моделирования, правильно интерпретировать результаты имитационных экспериментов путём привлечения технологий экспертных систем и др.

Разработке методов и средств анализа имитационных моделей помимо рассмотренных работ [19—21] посвящены многочисленные публикации таких авторов, как J. Kleijnen, L. Friedman, H. Pierrel, K.-P. Huber, H. Szczerbicka. Наиболее интенсивно развиваются статистические мета-модели регрессионного типа [29—32], имеются примеры разработки мета-моделей с использованием нейронных сетей и др. Традиционные приложения мета-моделирования включают в себя планирование имитационных экспериментов, построение регрессионных моделей для анализа поведения исследуемых объектов и создания аналитических моделей, описывающих глубинные закономерности поведения сложных объектов.

## 7. ОПТИМИЗАЦИОННО-ИМИТАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В УПРАВЛЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫМИ СИСТЕМАМИ

Известны несколько примеров решения задач управления с помощью мета-моделей дискретно-событийных организационных систем. Задача повышения мощности Балтийского контейнерного терминала Рижского коммерческого порта была поставлена в связи с устойчивым ростом объёма перевозок, играющим важную роль в транзите грузов через Латвию [33, 34]. Имитационная макро-модель терминала основана на его формализованном представлении в виде двунаправленной логистической сети, в которой каждый поток контейнеров проходит через специальные зоны хранения контейнеров. Зоны хранения контейнеров объединяют шесть выделенных логистических цепочек в единую сеть. В качестве примера цепочки можно указать: “причал терминала → зона хранения импортных контейнеров” (разгрузка судна). Каждая цепочка формализуется совокупностью происходящих в ней процессов и представляется потоковой диаграммой или структурной схемой соответствующего алгоритма. Временные характеристики отдельных операций выбраны в виде эмпирических распределений, полученных после наблюдения за работой отдельных разгрузочно-погрузочных и транспортных средств терминала. Детализированные потоковые диаграммы транслируются в моделирующие программы на языке SIMAN в среде имитационного моделирования ARENA [35].

Результирующая коммерческая модель терминала содержит более 1000 параметров и переменных, в том числе случайных. Выходные данные имитационных экспериментов послужили исходным материалом для мета-моделирования. Построены и протестированы 20 имитационных мета-моделей регрессионного типа. С их помощью проведен анализ влияния числа используемых трейлеров и вилочных погрузчиков на показатели эффективности использования основных транспортных ресурсов терминала и на среднюю продуктивность причалов.

Для учёта ситуации на рынке электроэнергии и прогнозирования коммерческих последствий принимаемых решений необходима модель, объединяющая рыночную экономику спроса и предложения с технической моделью сети передачи электроэнергии. Такая модель создана и реализована как пакет прикладных программ GridView [36—38]. Модель имитирует будущее развитие рынка электроэнергии час за часом для интервалов времени от одного дня до нескольких лет. Стоимость в долларах за 1 МВт · ч поставки следующего приращения нагрузки (location market price — LMP) в определенном месте расположения сети передачи электроэнергии, т. е. местная рыночная цена, используется как один из ключевых показателей состояния рынка. На основе LMP определяется количество оплачиваемой и потребляемой электроэнергии. Районы с высоким значением LMP следует рассматривать как более выгодные для расположения новых электростанций. Значения LMP, различающиеся в двух точках сети передачи электроэнергии, указывают на слабые участки линии передачи электроэнергии, а разница между ними может служить индикатором уровня ограничения пропускной способности. Для каждого ограничения на передачу можно определить теневую цену как индикатор экономической выго-

ды при повышении пропускной способности линий электропередачи. Теневая цена даёт денежно-кредитную экономию для рынка. Она может быть реализована путём увеличения предела пропускной способности линий электропередачи.

Пакет GridView позволяет анализировать как крупномасштабные сети передачи электроэнергии, так и рынки электроэнергетики. Моделирование максимально приближено к реальности. В качестве примера успешного применения этого пакета можно указать моделирование энергетической системы, покрывающей пятую часть территории США и содержащей более 18 тыс. линий.

Компания "Adica Consulting" разработала и предлагает использовать ряд программных продуктов, предназначенных для решения проблем электроэнергетики с помощью имитационных моделей [39].

Универсальный программный пакет ENPER с развитым графическим интерфейсом моделирует децентрализованный процесс принятия решений в энергетических системах, учитывает альтернативы поставки. Пакет настраивается на различные предпочтения потребителей энергии и поставщиков, например, пределы способности производить электроэнергию, правительственную политику (налоги, субсидии, приоритет для внутреннего ресурса по импортированному ресурсу и др.). Основные входные параметры содержат информацию о структуре энергетической системы, статистику потребления энергии в базисном году, включая продукцию и уровни потребления, цены, требуемый проектируемый рост энергии, технологические и политические ограничения. Пакет ENPER применяется для анализа приоритетной энергии и экологических проблем в более чем 80 странах, с его помощью выполняется моделирование на основе рынка, определяется ответ различных долей энергетической системы на изменения в ценах на энергию и уровнях спроса на энергию.

Пакет GTMax предоставляет крупным компаниям инструмент анализа разрегулированных рынков электроэнергии, моделирует региональные или национальные сети с учетом иерархии и функциональных связей, позволяет отслеживать почасовые сделки по электроэнергии, затраты, доходы.

Пакет даёт возможность вычислить экономические и финансовые затраты с учётом экологических ограничений, возникающих при использовании гидроэлектроэнергии. С его помощью решаются следующие проблемы:

- каково состояние рынка;
- какую мощность позволят генерировать и продавать каждый час в течение специфического периода технические средства;
- в какой момент необходимо принимать решение о закупке и (или) продаже мощности электроэнергии;
- каковы крайние запасы воды в гидробассейнах;
- каково значение программ управления потребителей;
- какова проектируемая доступная возможность передачи каждый час в регионе;
- будут ли выгодны инвестиции в расширение производства?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание имитационных моделей социально-экономических и производственных систем приносит значительный эффект при решении задач оптимизации и уп-

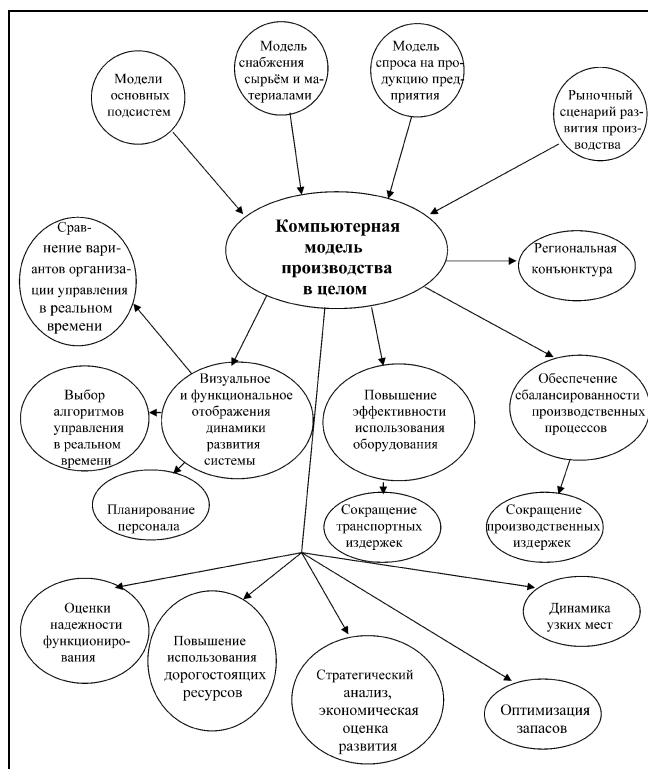


Рис. 2. Возможности компьютерного моделирования производственных систем

равления. Компьютерное моделирование незаменимо при предварительной проверке решений, связанных с изменением функционирования элементов социально-экономической сферы, позволяет значительно улучшить бизнес-процессы. На рис. 2 показаны основные направления применения компьютерных моделей производственных систем. Разнообразие применений говорит о том, что затраты на исследование и подготовку адекватной имитационной статистической модели обязательно окупаются и приносят прибыль.

Отметим, что современный этап развития имитационного моделирования характеризуется увеличением числа и разнообразия методов обработки результатов имитационных экспериментов. Можно отметить две особенности статистики, содержащей результаты имитационных экспериментов. Первая состоит в том, что статистика не вполне адекватна реальным процессам, поскольку получена в результате обобщения сведений, полученных из реальной статистики и путём изучения закономерностей поведения реального объекта, которые, естественно, не могут отразить закономерности поведения реального объекта с исчерпывающей полнотой. Вторая особенность состоит в том, что для имитации случайных воздействий и помех в стохастических имитационных моделях применяются датчики псевдослучайных чисел, имеющие ограниченный период, после которого значения моделируемых случайных чисел начинают повторяться. Методы обработки результатов имитационных экспериментов обязательно должны учитывать эту особенность при длинных реализациях. Несмотря на эти трудности, метамоделирование, под кото-





рым понимают построение моделей второго уровня, обобщающих сведения, полученные в результате многократных экспериментов с имитационными моделями объектов, даёт возможность полнее изучить закономерности поведения моделируемого объекта.

Приведенные в обзоре примеры показывают результаты применения новых алгоритмов моделирования, современных языков моделирования, актуальных информационных технологий для решения задач повышения эффективности эксплуатации сложных производственных систем. Они показывают, что, несмотря на трудоёмкость и затраты, эти приёмы и методы позволяют сделать существенный вклад в развитие моделируемых объектов и повышение качества жизни их создателей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах. — М.: Физматгиз, 1961. — 226 с.
2. Metropolis N., Ulam S. The Monte-Carlo Method // Journ. Am. Stat. Ass. — 1949. — Vol. 44, N 247. — P. 335—341.
3. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) / Н. П. Бусленко, Д. И. Голенко, И. М. Соболев и др. — М.: Физматгиз, 1962. — 332 с.
4. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах. — М.: Наука, 1964. — 364 с.
5. Бусленко Н. П. Метод статистического моделирования. — М.: Статистика, 1970. — 112 с.
6. Старосельский В. А. Об оптимизации функционалов, заданных статистической моделью // Экономика и математические методы. — 1967. — Т. 3, вып. 3. — С. 460—461.
7. Снапелев Ю. М., Старосельский В. А. Моделирование и управление в сложных системах. — М.: Сов. радио, 1974. — 264 с.
8. Бусленко Н. П., Соколов Г. А. Об одном классе задач оптимального распределения // Экономика и математические методы. — 1965. — Т. 1, № 1. — С. 123—136.
9. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). — М.: Наука, 1985. — 174 с.
10. Антонова Г. М. Методика ЛП<sub>τ</sub>-поиска с усреднением для исследования динамических стохастических систем, представленных имитационными моделями. — М.: Ин-т проблем управл. им. В. А. Трапезникова РАН, 2000. — 76 с.
11. Антонова Г. М. ЛП<sub>τ</sub>-поиск с усреднением как новая технология поиска рациональных решений / Прилож. к журн. "Информационные технологии". — 2001. — № 6. — 24 с.
12. Бродский Ю. И., Павловский Ю. Н. Имитационное моделирование и распределенные вычисления // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов / ВЦ РАН. — М., — 2003. — С. 30—40.
13. Эколого-социально-экономическая модель: гуманитарный и информационный аспекты. / Н. В. Белотелов, Ю. И. Бродский, Н. Н. Оленев, Ю. Н. Павловский // Информационное общество. — 2001. — № 6. — С. 43—51.
14. Белотелов Н. В. Устойчивое развитие и интегрированные модели // Открытое общество и устойчивое развитие: местные проблемы и решения / МИДА. — М., 2000.
15. Бродский Ю. И. Эколого-социально-экономическая имитационная модель: технология реализации // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов / ВЦ РАН. — 2001. — С. 89—107.
16. Павловский Ю. Н. Имитационные модели и системы. — М.: ФАЗИС; ВЦ РАН, 2000. — 131 с.
17. Бродский Ю. И. Проблемы создания центра имитационного моделирования в Интернет // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов / ВЦ РАН. — М.; 1998. — С. 29—35.
18. Бродский Ю. И., Лебедев В. Ю. Инструментальная система имитации MISS. — М.: ВЦ АН СССР, 1991. — 180 с.
19. Елохин В. Р., Санаев Б. Г. Аппроксимация моделей энергетических систем. Планирование и анализ регрессионных экспериментов. — Новосибирск: Наука, 1982. — 150 с.
20. Елохин В. Р. Имитационные методы при анализе и планировании экспериментов (регрессионный анализ). — Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2003. — 135 с.
21. Елохин В. Р., Елохин И. В. Имитационный метод статистической аппроксимации. — Там же. 2002. — 120 с.
22. Власов С. А., Шплихал И. Состояние разработок и перспективы развития имитационных систем для анализа функционирования и автоматизированного проектирования производства (на примере металлургии и машиностроения) // Моделирование и идентификация производственных систем / ИПУ. — М., 1988. — С. 5—17.
23. Власов С. А., Дургарян И. С. Принципы интеллектуализации средств имитационного моделирования и автоматизированной идентификации для производств повышенного риска // Идентификация и моделирование производств повышенного риска / ИПУ. — М., 1993. — Вып. 2. — С. 5—13.
24. Методы и модели управления проектами в металлургии / В. С. Смирнов, С. А. Власов, Е. С. Ваулинский, Б. И. Лебедев. — М.: СИНТЕГ, 2001. — 176 с.
25. Рожков И. М., Власов С. А., Мулько Г. Н. Математические модели для выбора рациональной технологии и управления качеством стали. — М.: Металлургия, 1990.
26. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ 2. — М.: Мир, 1987. — 646 с.
27. Шрайбер Т. Дж. Моделирование на GPSS. — М.: Машиностроение, 1980. — 592 с.
28. Pritsker A. A. B. The GASP 4 Simulation Language. — N.-Y.: John Wiley, 1974.
29. Kleijnen J. P. C. Regression Metamodels for Generalizing Simulation Results // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. — 1979. — Vol. SMC-9, N 2. — P. 93—96.
30. Kleijnen J. P. C., Standridge C. Experimental design and regression analysis: an FMS case study // European Journal of Operational Research. — 1988. — Vol. 33, N 3. — P. 257—261.
31. Kleijnen J. P. C. Verification and validation of simulation models // European Journal of Operational Research. — 1995. — Vol. 82, N 1. — P. 145—162.
32. Van Groenendaal, Kleijnen J. P. C. On the assessment of economical risk: factorial design versus Monte-Carlo methods // Journal of Reliability Engineering and System Safety. — 1997. — Vol. 57, N 1. — P. 103—105.
33. Merkur'yeva G. Computer Simulation in Industrial Management Games // Proc. of MIM 2000. IFAC Symp. on Manufacturing, Modeling, Management and Control / Eds. P. P. Groumpus, A. P. Tzes. — University of Patras, Rio, Greece. — 2000. — P. 69—73.
34. Выбор оптимального набора ресурсов с помощью имитационного моделирования / Ю. А. Меркурьев, В. В. Бардаченко, А. В. Соломенников, Ф. Камперман // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2004. — № 4. — С. 104—118.
35. Merkur'yev Y., Merkur'yeva G., Bruehl S. Container terminal macro modeling with the Arena simulation tool // Advanced Summer Institute'98: Proceedings. ASI'98. Life Cycle Approaches to Production Systems Management, Control and Supervision. June 14—17, 1998. Bremen, Germany, 1998. — P. 306—310.
36. Ксяоминг Фенг, Вилли Вонг, Ле Танг. GridView. Моделирование ситуации на рынке электроэнергии для оптимизации использования основных средств // АББ Ревю. — 2003. — № 1.
37. Economic Evaluation of Transmission Congestion Relief Based on Power Market Simulations // IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, July 2003.
38. Xiaoming Feng, Jian Yang, et al. A New Breed of Software Tool for Integrated Electrical Power System and Market Analysis — GridView // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, July 21—25. — 2002.
39. www.adica.com

☎ (095) 334-78-29

E-mail: gmant@ipu.ru

tsvirkun@ipu.ru

