

ПРОБЛЕМНО-
ОРИЕНТИ-
РОВАННОЕ
МОДЕЛИ-
РОВАНИЕ
ПРОИЗВОД-
СТВЕННО-
ТРАНСПОРТНЫХ
СИСТЕМ

В. И. Гриценко
А. А. Панченко
А. П. Лапа

ПРОБЛЕМНО- ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО- ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1987

Н.Б.Б. 2017 Киев

Приближенно-ориентированное моделирование производственно-транспортных систем / Гриценко В. И., Панченко А. А., Лапа А. П.— Киев : Науки. думки, 1987.— 160 с.

Рассмотрены вопросы создания оптимизационно-имитационных систем для планирования и управления производственно-транспортными объектами в черной металлургии на отраслевом и заводском уровне, приведены результаты экспериментов, показана возможность использования полученных результатов для принятия эффективных управленческих решений и выработки оптимальной стратегии поведения исследуемых объектов.

Для студентов, инженеров и специалистов, занимающихся разработкой и применением методов оптимизации и имитационного моделирования в сфере проектирования и планирования транспортно-технологических процессов предприятий черной металлургии.

Ил. 2б. Тбл. 17. Библиогр.: с. 154—158 (95 назв.).

Ответственный редактор *Н. В. Яровицкий*

Рецензенты *А. А. Бакаев, Н. А. Чередниченко*

Предисловие	5
Глава 1. Общие сведения о проблемно-ориентированном моделировании	8
§ 1. Понятие проблемно-ориентированного имитационного моделирования	8
§ 2. Анализ эффективности и определения имитации производственно-экономических и транспортных процессов	11
§ 3. Область применения проблемно-ориентированного имитационного моделирования	13
§ 4. Автоматное моделирование сложных систем	17
§ 5. Особенности моделирования транспортно-технологических систем	21
Глава 2. Методика проведения имитационных экспериментов	24
§ 1. Основные этапы имитационного эксперимента	24
§ 2. Изучение моделируемой системы и формулировка проблемы — начальные этапы имитационных экспериментов	26
§ 3. Структура формализованного описания и математической имитационной модели	28
§ 4. Разработка моделирующих алгоритмов	33
§ 5. Вопросы разработки программного обеспечения имитационных моделей	36
§ 6. Проверка пригодности имитационной модели	41
§ 7. Планирование и обработка результатов имитационного эксперимента	44
Глава 3. Модели производственно-экономических и транспортных систем массового обслуживания	48
§ 1. Модель одноканальной системы массового обслуживания	48
§ 2. Численные эксперименты с моделью погрузочно-транспортного узла	51
§ 3. Имитационная модель многофазной производственной системы массового обслуживания	56
§ 4. Многоканальная система и некоторые обобщения имитационных моделей систем массового обслуживания	61
§ 5. Автоматное моделирование многоканальной системы массового обслуживания	63

Глава	4. Моделирование работы карьерного транспорта	67
§ 1.	Описание объекта моделирования	67
§ 2.	Построение математических моделей задач оперативного управления карьерным транспортом	70
§ 3.	Имитационные эксперименты с моделью оперативного управления карьерным транспортом	73
§ 4.	Модель управления качеством перевозимого сырья	77
§ 5.	Имитационное исследование оптимизационной модели планирования работы карьерного транспорта	80
§ 6.	Оперативное управление автомобильным транспортом на железорудном карьере	86
Глава	5. Имитационные модели в АСУ промышленным транспортом	95
§ 1.	Общие сведения об имитационном моделировании транспортно-технологических комплексов	95
§ 2.	Транспорт металлургического предприятия как объект управления	96
§ 3.	Принципы построения АСУ транспортом металлургического предприятия	98
§ 4.	Имитационные процедуры в моделях маршрутизации движения транспортных средств	101
Глава	6. Модели управления запасами и имитация системы управления снабжения сырьем	108
§ 1.	Постановка общей задачи управления запасами	108
§ 2.	Имитационные модели управления запасами	110
§ 3.	Модель планирования доменного производства и управления запасами железорудного сырья	113
§ 4.	Численные эксперименты с моделью управления запасами и распределением железорудного сырья	118
§ 5.	Модель управления многофазной системой снабжения сырьем	122
Глава	7. Имитационное моделирование и проблемы отраслевого планирования	126
§ 1.	Постановка задачи отраслевого планирования производства продукции	126
§ 2.	Имитационная модель и алгоритмы выбора оптимального плана производства металлургической продукции	128
§ 3.	Экономико-статистическая и балансовая модель производства агломерата	134
§ 4.	Отраслевое планирование перевозок железорудного сырья методами оптимизации и имитационного моделирования	139
§ 5.	Перспективы создания отраслевой автоматизированной системы имитационного планирования	146
§ 6.	Некоторые вопросы информационного обеспечения имитационных систем	150
Список литературы		154

Повышение эффективности управления отраслями и предприятиями народного хозяйства страны в настоящее время немыслимо без широкого внедрения современных средств вычислительной техники, экономико-математических методов и создания на их основе автоматизированных систем управления (АСУ). В последние годы для исследования поведения, выработки стратегии развития, а также для принятия оптимальных управленческих решений в экономических системах находят широкое применение методы моделирования и, в первую очередь, экономико-математического и имитационного.

Данная книга посвящена вопросам применения в управлении проблемно-ориентированного моделирования, т. е. моделирования, направленного на исследование конкретных проблем и выработки конструктивных решений при создании АСУ и автоматизации принятия управленческих решений. Здесь в проблемно-ориентированном моделировании сочетаются различные аспекты имитационного моделирования и оптимизационных методов. Большое внимание в книге уделено имитационным экспериментам с моделями различных производственно-экономических и транспортных систем.

Проблемно-ориентированная имитационная модель, являющаяся машинным аналогом исследуемого производственно-экономического процесса, позволяет заменить эксперимент непосредственно с процессом на численную имитацию с помощью ЭВМ процессов, происходящих в нем. Таким образом, имитационное моделирование является методом, во многом продолжающим традиции математики в аналитическом исследовании проблем функционирования сложных экономических систем и организаций.

Известно, что натурные эксперименты с реальными системами невозможны ввиду их дороговизны, длительных сроков проведения и риска получить значительные убытки и другие нежелательные социально-экономические последствия. Бурное развитие вычислительной техники стало в настоящее время решающим условием широкого внедрения математических методов в описании и экспериментальном исследовании сложных производственно-экономических, и в том числе транспортно-технологических систем. Наибольшее распространение при этом получили методы математического программирования: линейного, динамического, нелинейного, целочисленного и т. д. Однако на пути использования математического

программирования как инструмента решения задач управления производственно-экономическими системами возникает ряд серьезных и зачастую непреодолимых трудностей [58]. С одной стороны, для эффективного использования указанных методов требуется сокращение размерностей моделей и соответственно пренебрежение рядом факторов, влияющих на результаты функционирования исследуемой системы. С другой стороны, полученные таким образом модели являются слишком грубыми и несовершенными для практического использования. Кроме того, проблемная ориентация исследований показывает, что не всегда нужно стремиться к получению единственного оптимального решения, и иногда целесообразно рассматривать все их многообразие в условиях различных неопределенностей и вероятностного характера альтернатив.

В настоящее время активно ведется поиск методов, которые дали бы возможность продуктивно изучать и использовать в управлении экономическими системами более адекватные проблемно-ориентированные модели. Наиболее перспективным направлением в преодолении перечисленных выше трудностей и решении поставленных проблем является имитационное моделирование.

Важной предпосылкой широкого применения имитационного моделирования является также то, что современные ЭВМ обладают не только огромным быстродействием и памятью, но и развитым набором внешних устройств и совершенным программным обеспечением. Последнее, а также широкий спектр терминалов позволяют эффективно организовать диалог человека и машины и, таким образом, система «человек — ЭВМ» становится быстродействующей системой с огромной памятью и богатыми возможностями информального анализа процессов функционирования систем. Использование при этом имитационного моделирования позволяет изучать проблемы функционирования систем во всей их сложности и многообразии, не ограничиваясь рамками, удобными для применения тех или иных известных методов математического программирования.

В первых двух главах настоящей книги коротко освещены основные вопросы проблемно-ориентированного моделирования, а также использования имитации на ЭВМ в исследованиях сложных систем. Подробно описаны методики проведения имитационных экспериментов с моделями различных производственно-экономических и транспортно-технологических систем.

В последующих главах приводятся примеры построения проблемно-ориентированных имитационных моделей и проведения экспериментов с ними на основе предложенной методики. В большинстве примеров исследуются реальные системы, а в качестве исходной информации для имитационных экспериментов используются фiktические данные экономико-статистического анализа работы горнодобывающих предприятий, черной металлургии и других отраслей. Основное внимание при этом уделено разработке математических моделей, ориентированных на исследование конкретных проблем функционирования систем, а также на алгоритмизацию имитационного моделирования. В некоторых примерах нашли отражение

современные тенденции стыковки имитационных процедур и методов оптимизации управленческих решений.

В последней главе освещены некоторые проблемы создания имитационной системы в отраслевом планировании производства однородной массовой продукции. При этом рассмотрены вопросы создания базы данных системы, унификации программных модулей, организации диалогового режима и т. п.

Предлагаемые в книге теоретические исследования, методические положения и практические результаты получены авторами на основе проблемно-ориентированного моделирования и имитационных исследований конкретных производственно-экономических и транспортно-технологических систем, а также на основе изучения и обобщения опыта отечественных и зарубежных ученых.

Отдельные разделы книги были написаны при участии Садовского А. В. (гл. 4, § 6), Назаренко Н. А. (гл. 6, § 5), Пападайло В. А. (гл. 7, § 5).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

§ 1. Понятие проблемно-ориентированного имитационного моделирования

Поскольку настоящая книга посвящена проблемно-ориентированному моделированию сложных производственно-экономических систем, необходимо прежде всего уточнить, что мы будем понимать под моделированием вообще и под проблемно-ориентированным имитационным моделированием на ЭВМ в частности.

Под моделированием вообще понимается исследование объектов и процессов окружающего мира косвенным путем, анализируя поведение и характеристики различного рода вспомогательных объектов, которые называются моделями. Известно, что определить влияние и оценить последствия того или иного воздействия на исследуемый или проектируемый объект в реальных условиях зачастую не представляется возможным. Идея моделирования достаточно проста и привлекательна и имеет давнюю историю. Моделирование находит широкое применение в различных областях человеческой деятельности именно потому, что дает возможность исследователю или проектировщику проводить различные эксперименты на моделях, в то время как на реальных объектах это делать невозможно или нецелесообразно.

Термин «модель» имеет широкое распространение как в различных научных, так и в общеупотребительных определениях. Поэтому в жизни нам весьма часто приходится сталкиваться с большим многообразием моделей. Например, модели одежды, макеты архитектурных сооружений на местности, модели кораблей и летательных аппаратов, модель атомного ядра и глобус как модель планет и т. д.

Функции моделей столь разнообразны (от детских игрушек до проектов космических кораблей), а сама идея моделирования носит столь общий характер, что дать их развернутую классификацию весьма затруднительно. В общем, чаще всего различают физическое и математическое моделирование [12].

При физическом моделировании модель воспроизводит изучаемый объект или процесс с сохранением его физической природы, например внешнего вида объекта с уменьшенными или увеличенными геометрическими размерами или химического состава компонентов исследуемого процесса химической тех-

нологии. На таких моделях, к примеру, изучают динамические свойства летательных аппаратов продувкой в аэродинамических трубах, пространственные соотношения архитектурных или заводских сооружений при их проектировании, разрабатывают новые процессы химического синтеза.

Физическое моделирование основано на развитой научной дисциплине — теории подобия, с помощью которой определенным образом устанавливается соответствие между процессом-моделью и процессом-оригиналом. Условия реализации процесса-модели могут значительно отличаться от условий, свойственных процессу-оригиналу. С одной стороны, эти условия создаются таким образом, чтобы обеспечить максимальную простоту эксперимента и при этом существенно сократить затраты материальных ресурсов по сравнению с прямым экспериментом на исследуемом объекте. С другой стороны, условия физического моделирования нельзя выбирать совершенно произвольно вне связи с закономерностями, свойственными процессу-оригиналу. Между исследуемыми факторами должны соблюдаться некоторые соотношения подобия, гарантирующие практическую полезность и возможность использования данных, полученных путем моделирования для изучения свойств и закономерностей процесса-оригинала.

Необходимо отметить, что моделирование в таком виде имеет весьма ограниченную сферу применения. Более широкими возможностями обладает моделирование как метод исследования различных процессов путем изучения явлений, имеющих разное физическое содержание, но описываемых одинаковыми математическими соотношениями. Можно назвать много примеров моделирования, в которых используются аналогии между механическими, тепловыми, электрическими, биологическими и другими явлениями. Мы не будем останавливаться на примерах из этой области аналогового моделирования, хотя на практике они встречаются довольно часто.

Здесь важно и необходимо подчеркнуть следующую характерную особенность указанного вида физического моделирования. Она состоит в том, что при изучении любого процесса методом моделирования необходимо и возможно построить математическую модель (математическое описание) изучаемого процесса или объекта. Таким образом, из аналогового физического моделирования органически вытекает математическое моделирование. Оно состоит в том, что различные по природе физические процессы описываются идентичными математическими соотношениями, которые можно исследовать известными математическими методами. Исследованию в данном случае уже подвергается не какой-либо физический аналог изучаемого процесса, а его математическая модель.

Под математической моделью данного реального процесса мы будем понимать совокупность математических соотношений, которые связывают выходные характеристики процесса с параметрами исследуемой системы, входными характеристиками и начальными условиями.

Построение математической модели возможно лишь в том случае, когда определены переменные величины, характеризующие процесс с количественной точки зрения. Различают обычно входные и выходные переменные, первые из которых подразделяются на зависимые, или управляемые, и независимые, или управляющие. Естественно, всегда существуют соотношения, выражающие в виде математических зависимостей реальные связи между входными и выходными переменными. Совокупность таких зависимостей можно исследовать как аналитическими, так и статистическими методами с применением ЭВМ. Последние применяются в том случае, когда модель описывается сложными нелинейными и стохастическими зависимостями больших размерностей. В частности, такими зависимостями описываются различные производственные процессы и производственно-экономические и транспортно-технологические системы, исследованию которых посвящена настоящая книга.

Под проблемно-ориентированным моделированием в этой книге понимаем математическое моделирование в составе АСУ различных классов производственно-экономических систем. При этом основное внимание уделено стыковке оптимизационных экономико-математических моделей и методов имитационного моделирования.

Основу проблемно-ориентированного имитационного моделирования составляют исследования математических моделей аналитическими и статистическими методами с применением ЭВМ.

Под имитационным моделированием производственно-экономических систем на ЭВМ будем понимать процесс конструирования экономико-математической модели системы и проведения с ее помощью на ЭВМ имитации процесса функционирования системы во взаимодействии с внешней средой в целях исследования экономических и производственных показателей работы системы и выбора эффективной стратегии ее развития и функционирования.

Применение имитационного моделирования позволяет оценивать различные проектные решения по развитию и реконструкции производственных объектов, составлять близкие к оптимальным планы работы предприятий и отраслей, принимать рациональные управленческие решения, оценивать экономические показатели развития систем и т. п.

Диапазон применения проблемно-ориентированной имитации на ЭВМ может простирается от моделирования различных

форм деятельности отдельного участка, цеха, предприятия (например, имитации процесса управления запасами, загрузки оборудования, оперативного планирования производства) до имитации работы отраслей народного хозяйства и долгосрочного развития экономики.

§ 2. Анализ эффективности и определения имитации производственно-экономических и транспортных процессов

При выработке стратегии развития и функционирования производственно-экономических систем, т. е. при планировании и управлении их работой на заданном отрезке времени, имеются различные способы оценки эффективности альтернативных стратегий. Во-первых, есть возможность, по крайней мере теоретическая, проводить управляемые эксперименты с предприятием, объединением, отраслью и т. д. по аналогии с физическим моделированием. Такие эксперименты, которые мы будем называть натурными, проводились и проводятся в народном хозяйстве страны, в основном при переходе на более совершенные методы хозяйствования.

Натурные эксперименты с производственно-экономическими системами, однако, имеют существенный недостаток, связанный с большими сроками их осуществления, невозможностью практически сравнить различные стратегии на основании единых исходных данных и значительным риском экономических потерь. В таких экспериментах оценку правильности выработанных решений можно получить, лишь сравнивая показатели функционирования нескольких производственно-экономических систем, развивающихся в прошлом по различным стратегиям экономического управления. В приведенном примере, сравнивая результаты деятельности предприятий, работающих в различных условиях хозрасчета в течение ряда лет, удалось доказать правильность выбранной хозяйственно-экономической политики.

В том случае, когда нельзя провести управляемый натурный эксперимент или невозможно сравнить результаты различных стратегий экономического управления системой, начиная с прошлого периода, остается единственная возможность построить экономико-математическую, направленную на исследование конкретной проблемы модель, связывающую входные и выходные переменные системы и проводить эксперименты с построенной моделью.

Очень часто экономико-математические модели являются системами значительного числа сложных, зачастую нелинейных уравнений большой размерности, содержащих случайные возмущения, что не позволяет применять аналитические методы

для их исследования и анализа приемлемости экономических решений.

Таким образом, имитационные эксперименты на ЭВМ с моделями производственно-экономических систем, и в том числе транспортно-технологические, становятся наиболее доступным и эффективным инструментом выбора и оценки альтернативных стратегий управления такими системами. Под имитацией здесь обычно понимают численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных производственно-экономических систем в течение продолжительного периода времени [35, 63]. Очевидно, что основой любого имитационного эксперимента служит модель исследуемой системы и проблем ее функционирования. Для полного понимания имитации на ЭВМ введем следующий набор математических определений.

Пусть Y означает некоторую выходную переменную или вектор выходных переменных, поведение которых мы исследуем. В качестве таковых могут быть: прибыль, объем реализации продукции, суммарные издержки и т. п. Переменная Y зависит от вектора входных переменных $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ в соответствии с функциональным соотношением:

$$Y = f(X). \quad (1.1)$$

Координатами вектора X являются зависимые и независимые переменные, связанные между собой параметрами системы.

Используя термины теории планирования эксперимента, переменную Y назовем реакцией, а переменные x_i ($i = 1, 2, \dots, N$), факторами. Функция f называется поверхностью реакции (поверхностью отклика).

Частным случаем соотношения (1.1) является простая линейная модель:

$$Y = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i, \quad (1.2)$$

где α_i — некоторые параметры системы.

В том случае, когда имеется возможность проводить натурные эксперименты с производственно-экономической системой, изменяя вектор X и наблюдая реакцию Y , можно оценить параметры α_i ($i = 1, 2, \dots, N$) и затем интерпретировать модель (1.2) так:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^N \bar{\alpha}_i x_i, \quad (1.3)$$

где $\bar{Y}$ и $\bar{\alpha}_i$ — средние оценки величины Y и α_i .

В простейшем случае модель (1.3) может быть построена как линейная регрессионная зависимость между входными переменными векторами X и исследуемым Y .

В том случае, когда прямые натурные эксперименты с системой невозможны, имеет смысл проводить некоторые квазиэксперименты с математическими моделями этих систем на основе метода имитационного моделирования. При этом на ЭВМ можно имитировать реакции Y , изменяя либо параметры α_i ($i = 1, 2, \dots, N$), либо вектор X , либо обе эти величины одновременно.

Предложенная модель (1.3) слишком проста для исследований методами имитационного моделирования. Чтобы описанная модель была более реалистичной, можно учесть в ней случайные воздействия в виде величины ε с функцией плотности распределения вероятностей $F(\varepsilon, \mu)$, где μ — вектор параметров распределения. В такой модификации модель может быть записана в виде

$$Y = \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i + \varepsilon. \quad (1.4)$$

Модель (1.4) становится более адекватной, но значительно усложняется, если в ней учесть зависимости параметров и переменных системы от текущего времени, имеющие зачастую нелинейный характер.

В заключение отметим, что имитация случайных величин и переменных в моделях (1.1) — (1.4) на ЭВМ может осуществляться с помощью различных датчиков случайных чисел. Поэтому считается [4], что численные имитационные эксперименты являются развитием идей метода статистических испытаний применительно к моделям производственно-экономических и прочих сложных систем.

§ 3. Область применения проблемно-ориентированного имитационного моделирования

Имитационное моделирование как достаточно универсальный инструмент исследования проблем функционирования сложных систем имеет весьма обширную сферу применения.

Имитационные эксперименты позволяют с помощью ЭВМ исследовать математические модели таких объектов и процессов, где применение различных аналитических методов по тем или иным причинам невозможно. Для некоторых сложных систем имитационное моделирование является подчас единственным доступным методом исследования как на стадии проектирования, так и в процессе развития и функционирования [1, 36, 42, 56].

К достоинствам имитационных экспериментов на ЭВМ следует отнести то, что их результаты по своей полезности для решения практических задач близки к результатам натурального эксперимента. При этом затраты времени и материальных ресур-

сов на имитационное моделирование во много раз меньше затрат на натурные эксперименты, если последние вообще доступны исследователю.

В настоящее время в нашей стране и за рубежом разработано и используется в практической деятельности огромное количество имитационных проблемно-ориентированных моделей. Имитационные эксперименты проводятся с моделями технологических процессов, военных объектов, социальных систем и т. д. Наиболее широкое применение находит имитационное моделирование в исследовании экономических процессов производства. Применение имитационных экспериментов здесь простирается от анализа простейших систем массового обслуживания и оперативного управления производством до выработки стратегии и перспектив развития экономики государства [33—36, 48, 56, 57, 63, 69, 75].

Важное место имитационное моделирование занимает в различных АСУ. В нашей стране в настоящее время создается много новых и совершенствуются работающие АСУ технологическими процессами, предприятиями, объединениями и отраслями народного хозяйства. Создаются также республиканские и общегосударственные АСУ.

Метод имитационного моделирования широко применяется при проектировании систем, а также при решении различных задач управления в функциональных подсистемах АСУ. По результатам имитационных экспериментов можно определить экономичность производственного процесса, существенные с точки зрения автоматизированного управления, для задач управления выбрать наиболее эффективные критерии и построить их иерархию, обосновать экономическую эффективность внедрения системы, отдельных ее подсистем и задач. Имитационное моделирование позволяет оценить различные варианты структуры проектируемых систем, работоспособность и надежность технических средств, уточнить объемы и потоки необходимой управляющей информации. Широко применяется имитационное моделирование также при создании баз данных различных автоматизированных информационных систем [14].

В автоматизированных системах планирования с помощью имитационных экспериментов могут быть успешно решены задачи текущего и долгосрочного планирования работы производственно-экономических систем. Проблема выбора наилучшего из множества допустимых вариантов плановых заданий имеет два аспекта: необходимость охарактеризовать все возможные в данной ситуации плановые решения и метод выбора наилучшего из них [2, 36, 42, 87]. Проблема в указанных аспектах может быть разрешима в человеко-машинных системах планирования, в которых множество вариантов плановых ре-

ний формируется при помощи ЭВМ, а выбор окончательного осуществляется специалистом, именуемым лицом, принимающее решение (ЛПР). Такие системы еще называются диалоговыми.

Имитационное моделирование в диалоговых системах планирования целесообразно использовать при формировании на ЭВМ множества допустимых вариантов плановых решений. При формировании указанных вариантов ЛПР задает начальные условия и основные ограничения, такие как директивные плановые задания, ограничения на объемы поставок сырья, на качество готовой продукции, на производительность агрегатов, на парк используемых транспортных средств и т. п. Затем с помощью математической модели, в которой имитируются показатели, имеющие случайный характер, строятся варианты планов, допустимые в пределах заданных ограничений. Кроме того, моделируются экономические показатели, характеризующие каждый из вариантов, на основании которых производится выбор наилучшего. Выбор наилучшего из множества построенных допустимых вариантов может производиться также на ЭВМ с помощью заранее построенной оптимизационной модели или при непосредственном участии ЛПР. Такой подход позволяет достаточно точно отразить существующие объективные взаимосвязи показателей производственных процессов и экономических объектов.

Следует отметить, что, по данным Шеннона [81], в зарубежной практике внутрифирменного планирования методы имитационного моделирования находят наиболее широкое применение (до 30 %) по сравнению с другими методами исследования операций и математического программирования, а, например, линейное программирование используется лишь в 20 % случаев.

Далее мы остановимся на некоторых примерах имитационного моделирования производственно-экономических и транспортно-технологических систем, используемых при проектировании АСУ и при решении задач отраслевого планирования.

В настоящее время имитационное моделирование наиболее широко используется в оперативном управлении производством. Отметим, что первые опыты более чем двадцатилетней давности использования имитационного моделирования также связаны с оперативным управлением производством [12, 35]. Известны разработки имитационных моделей управления станками и агрегатами, моделей одно- и многоканальной системы массового обслуживания, выполнялось моделирование работы сборочного конвейера и других производственных операций машиностроительных предприятий. Далее для некоторых систем оперативного управления производством мы рассмотрим примеры построения имитационных моделей и выполним некоторые эксперименты с построенными моделями и транспортно-технологическими процессами.

Нельзя не отметить, что имитационное моделирование наряду с несомненными достоинствами имеет и ряд недостатков, ограничивающих в некоторой степени сферу его применения.

Существенным недостатком является прежде всего то, что результаты одного эксперимента всегда носят частный характер, соответствующий фиксированным значениям параметров модели и начальных исходных данных. Для получения приемлемого общего решения задачи эксперименты приходится повторять многократно, меняя в известных пределах параметры и начальные условия. При исследовании громоздких моделей с большим количеством входных переменных и параметров затраты на проведение экспериментов, в частности на подготовку исходных данных, машинное время и обработку результатов, могут оказаться весьма существенными. А ввод в модель лишь одной дополнительной выходной переменной может увеличить эти затраты вдвое.

Устранить такой недостаток можно путем декомпозиции сложной модели на более простые, а также разумным сокращением управляемых переменных и исследуемых выходных. При этом следует пренебрегать переменными, отсутствие которых не существенно сказывается на адекватности модели. Заметим, что готовых рецептов по сокращению размерности модели нет, и в каждом конкретном исследовании требуется индивидуальный подход.

Отсюда вытекает и второй недостаток имитационного моделирования, связанный с необходимостью индивидуального и зачастую оригинального подхода к решению каждой практической задачи. Другими словами, в реальных условиях трудно или практически невозможно использовать какие-либо универсальные модели и методы имитации.

Пути преодоления этого недостатка также связаны с известными приемами декомпозиционного анализа сложных систем [51]. Так, используя приемы декомпозиции сложной системы по уровням иерархии и по элементам на каждом уровне, можно выделить отдельные подсистемы, для которых целесообразно построить унифицированные имитационные модели. При этом значительно сокращается размерность математических моделей исследуемых систем и задача состоит лишь в том, как агрегировать результаты экспериментов на унифицированных моделях подсистем в конечные результаты исследований всей реальной системы.

Для ряда производственных объектов эти проблемы в некоторой степени решают методы построения моделей агрегатных систем, разработанные советскими учеными Н. П. Бусленко, И. И. Коваленко и др. [13, 14]. Под агрегатом здесь понимается математический объект, преобразующий информацию посред-

ством заранее заданных операторов переходов внутреннего состояния, операторов выходов при определенном множестве входных, выходных и управляющих сигналов, а также множества состояний агрегатов. При этом подразумевается, что агрегаты функционируют как в дискретном, так и в непрерывном времени и нет ограничений на способы задания операторов.

Агрегат в таком определении имеет широкие возможности для построения имитационных моделей систем с разнообразными структурными и функциональными особенностями. Предложенный подход был успешно применен для имитации работы сборочных конвейеров, отдельных цехов и участков некоторых машиностроительных предприятий.

Частным случаем агрегатов можно рассматривать вероятностные автоматы, позволяющие унифицированно описывать достаточно широкий класс имитационных моделей. В следующем параграфе мы рассмотрим более подробно понятие вероятностного автомата и способы построения автоматных имитационных моделей.

§ 4. Автоматное моделирование сложных систем

Одним из эффективных способов унификации имитационного моделирования является метод вероятностно-автоматного моделирования, разработанный в Институте кибернетики АН УССР Л. А. Бакаевым, Н. И. Костиной и Н. В. Яровицким [3, 4]. Метод базируется на основополагающих работах в области статистического моделирования советских ученых А. П. Бусленко, П. П. Коваленко и др.

Основными понятиями автоматного моделирования являются вероятностный и детерминированный автомат, а также система, описанная с помощью этих автоматов. Здесь под автоматом понимается дискретный (цифровой) автомат Мура с детерминированными выходами. При этом подразумевается, что изменение состояний автоматов и выдача выходных сигналов происходит лишь в целочисленные моменты времени, начальное состояние автомата заранее определено, случайные факторы влияют на формирование внутреннего состояния каждого автомата и выходные сигналы полностью определяются значениями входных сигналов и внутренним состоянием автоматов.

Таким образом, автомат однозначно определяется тремя величинами (скалярными или векторными): входным сигналом, внутренним состоянием и выходным сигналом. Внутреннее состояние в общем случае в любой момент времени зависит от входного сигнала и состояния в предыдущий момент времени.

Выходной сигнал находится в определенной функциональной зависимости от внутреннего состояния автомата.

В момент времени t входному сигналу $x(t) \in X$ соответствует некоторое значение внутреннего состояния $a(t-1) \in U$, где X и U — соответственно множество значений входных сигналов и множество внутренних состояний автомата. Значение $a(t-1)$ определяется через одну матрицу $A(x)$ из семейства стохастических, порядок которой совпадает с количеством элементов множества U . В свою очередь количество матриц семейства $A(x)$ равно мощности множества X . Каждое новое внутреннее состояние автомата через детерминированную функцию $\Phi(a)$ однозначно определяет значение выходного сигнала $y(t) \in Y$, где Y — множество значений выходных сигналов. Таким образом, функционирование автомата полностью описывается множествами X, U, Y , начальным состоянием $a(0)$, семейством переходных стохастических матриц $A(x)$ и функциональной зависимостью между внутренним состоянием и выходным сигналом $\Phi(a)$.

Определенный таким образом вероятностный автомат можно использовать при описании экономических систем. Однако при этом возникает необходимость более краткого описания автомата, особенно в связи с громоздкостью переходных матриц и возможной бесконечностью их семейства и порядка. Одним из путей преодоления указанных сложностей является замена семейства переходных стохастических матриц, входящих в определение вероятностного автомата, на систему логических высказываний относительно внутреннего состояния автомата и его входного сигнала, а также соответствующие системе условные функционалы переходов. Таблицу, устанавливающую соответствие между логическими высказываниями и функционалами, называют таблицей условных функционалов переходов (ТУФП) [4].

Следует отметить, что на практике зачастую весьма трудно перейти от семейства матриц $A(x)$ к ТУФП, особенно если первое является бесконечным. Поэтому, описывая функционирование объекта с помощью вероятностного автомата, авторы метода предлагают составлять ТУФП непосредственно из прямых свойств объекта, избегая при этом составления стохастических матриц $A(x)$.

В общем виде ТУФП автомата A , состоящая из логических высказываний, представляется следующим образом:

A	Если $x(t) \leq p_i^{(x)} \wedge_{i \in I, x} a(t) \leq p_i^{(a)}$,
	то $a(t+1) = f(x_i, a(t), x(t))$

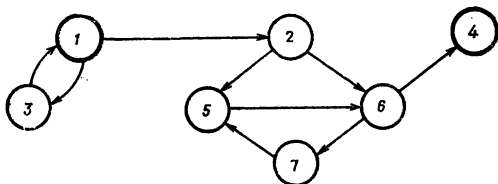


Рис. 1.1. Граф межавтоматных связей

Здесь $P_i^{(x)}$ и $P_i^{(a)}$ — целочисленные признаки, характерные для входного сигнала и внутреннего состояния автомата, которые определяются заранее при исследовании реального объекта. Количество таких признаков обычно небольшое и позволяет в ТУФП описать все возможные логические высказывания. В зависимости от истинности i -го логического высказывания в верхней части таблицы внутреннее состояние автомата в момент времени $t + 1$ определяется равным случайной его реализации ξ_i по известному закону распределения или константе a_i , определенной заранее при исследовании объекта.

С помощью набора вероятностных и детерминированных автоматов может быть описана модель сложной экономической системы. Такая модель представляет собой совокупность автоматов, связанных таким образом, что выходные сигналы одних автоматов совпадают с входными сигналами других. При этом предполагается, что количество автоматов является конечным, и автоматы системы функционируют в режиме единого дискретного времени. Предполагается также, что от одного автомата к другому в момент времени t передается лишь один сигнал, и также исключается случай, когда входной сигнал автомата отождествляется с его выходным сигналом.

Таким образом, для описания модели необходимо определить все ее автоматы и описать их с помощью ТУФП или матриц $A(x)$ и указать на наличие или отсутствие связей для каждой упорядоченной пары автоматов системы.

Рациональное описание связей между автоматами системы можно представить в виде графа, отражающего качественные зависимости между автоматами. Количественные зависимости определяются множествами значений входных и выходных сигналов.

Пример графа, состоящего из семи автоматов, показан на рис. 1.1. Откуда видно, что некоторые автоматы (5 и 6) обладают векторным входным сигналом, т. е. сигналом, поступающим от двух и более автоматов. Среди автоматов имеются такие (4), состояния которых не влияют на состояние какого-либо другого автомата, а также группа автоматов (1—3), на которые не

влияют другие автоматы. В первом случае говорят о выходном полюсе, а во втором — о входном полюсе системы.

Графическое представление автоматной системы достаточно наглядно, однако при большом количестве автоматов оно оказывается весьма громоздким и неприсмелым. Поэтому авторы [4] предлагают задавать межавтоматные связи системы в виде матрицы, состоящей из символов, описывающих наличие качественных, а по возможности и количественных связей.

Качественные связи можно описать с помощью матрицы, элементами которой являются единицы, если существует связь между парой автоматов, и нули в противном случае. Для показанного выше примера такая матрица представляется следующим образом:

Номер автомата	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0
3	1	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0
6	0	0	0	1	0	1	1
7	0	0	0	0	1	0	1

Чтобы описать количественные межавтоматные связи системы, необходимо в представленной выше матрице вместо единицы подставить условные обозначения множеств значений входных и выходных сигналов соответствующих автоматов. При этом по диагонали будут расположены описания множеств значений внутренних состояний автоматов.

Заметим, что для полного описания автоматной модели необходимо, кроме составления таблицы межавтоматных связей, составить исходно составленные заранее ТУПФ всех автоматов системы, а также задать вектор начального состояния системы, выписав начальные состояния автоматов в порядке, соответствующем их номерам.

В заключение отметим, что некоторые допущения, принятые при описании вероятностных автоматов, могут значительно ограничить сферу применения автоматного моделирования при имитационных исследованиях производственно-экономических систем. Это, в частности, относится к допущению о дискретности временной координаты и целочисленности входного сигнала, выходного сигнала и внутреннего состояния автоматов модели. В некоторых разработках эти ограничения, однако, можно успешно преодолеть, используя, например, для формализованного описания идеи [86].

Метод автоматного моделирования является достаточно универсальным, однако универсализация может оказаться неприемлемой при моделировании некоторых реальных систем ввиду необходимости описания огромного количества автоматов и, как следствие, значительной громоздкости модели.

Отметим, что авторы метода, так же как и ряд других разработчиков, успешно использовали метод автоматного моделирования для описания и исследования целого ряда сложных систем и в том числе некоторых производственно-транспортных [43, 65, 88].

Возможности использования автоматных моделей для описания и имитации некоторых производственно-экономических и транспортно-технологических систем будут рассмотрены в последующих главах.

§ 5. Особенности моделирования транспортно-технологических систем

Известно, что большинство моделей управления экономикой и производством опирается на балансовые соотношения, связывающие различные технико-экономические показатели функционирования систем сырья, материалов, топлива и прочих ресурсов, используемых в производственном процессе. Модели, основой которых являются указанные балансовые соотношения, очень часто описываются как производственно-транспортные экономико-математические.

В таких моделях можно выделить два относительно независимых блока ограничений. В первом блоке переменные, отражающие производственно-экономическую сущность функционирования системы: объемы производства, мощности нормы расхода сырья, топлива, материалов, нормативы использования трудовых, финансовых и других ресурсов связываются посредством функциональных соотношений. Второй блок является непосредственно транспортным и отражает связи поставщиков с потребителями, транспортные издержки и специфику функционирования транспорта, направленную на обеспечение выполнения плана производства исследуемой системы. Здесь должны быть сбалансированы объемы поставок и потребления грузов с выделенными для перевозок транспортными средствами и пропускными способностями транспортных сетей.

Следует отметить, что специфика непосредственно транспортного процесса в производственно-транспортных моделях зачастую отражается недостаточно полно, хотя условия работы транспорта являются весьма сложными и могут оказывать существенное влияние на конечный результат моделирования. С другой стороны, построение моделей управления транспортом в отрыве

от моделей управления сопряженными экономическими системами делает первые недостаточно адекватными и пригодными для управления реальными транспортно-технологическими системами [5].

Поэтому основная особенность моделирования транспортно-технологических систем — необходимость тесного взаимодействия моделей или блоков (подмоделей), описывающих производственно-экономическую деятельность систем с процессами их транспортного обслуживания. Это в полной мере относится как к детерминированным экономико-математическим моделям, так и к моделям, учитывающим неопределенность функционирования систем и экономико-статистическим моделям, пригодным для имитационного моделирования. Данная особенность одинаково должна учитываться как на отраслевом уровне, так и на уровне управления предприятием и цехом.

Транспорт вне связи с сопряженными производственно-экономическими объектами представляет собой достаточно сложную технико-экономическую систему, моделирование которой обычно осуществляют с помощью комплекса взаимосвязанных экономико-математических блоков [53]:

блок определения необходимой исходной информации о требуемых перевозках и эксплуатационно-технических и экономических характеристиках элементов транспортной сети;

блок оптимального планирования и управления потоков по транспортной сети (одного или нескольких видов транспорта), включая определение загрузок отдельных элементов сети и распределение перевозок по видам транспорта;

блок оптимального планирования развития транспортной сети, включая при этом определение этапов и уровней строительства или реконструкции отдельных элементов сети;

блок планирования численности и структуры парка подвижного состава и других технических средств транспорта;

блок управления потребностью транспорта в ресурсах различных видов и их использованием.

Особенность перечисленных блоков заключается в том, что результаты решения соответствующих задач направлены на оптимизацию управления и планирования развития технологического транспорта. Исходная информация для решения задач в перечисленных блоках формируется при решении задач управления сопряженными производственно-экономическими системами (отраслями, подотраслями, предприятиями, участками и т. п.).

Стохастический характер переменных в условиях неопределенности и неполноты исходной информации, высокая динамика транспортно-технологических работ на многих народнохозяйственных объектах зачастую не позволяют использовать

для решения отдельных технико-экономических задач в составе АСУ известные методы математического программирования. В этом случае весьма эффективными и надежными становятся методы имитационного моделирования. В последующих главах рассмотрим примеры построения имитационных моделей для некоторых транспортно-технологических систем, а также приведем отдельные результаты имитационных экспериментов с построенными моделями.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

§ 1. Основные этапы имитационного эксперимента

Предлагаемая методика проведения имитационных экспериментов с моделями экономических систем, разработанных на основе ставших уже классическими трудов советских ученых Н. П. Бусленко, А. А. Бакаева, Н. Н. Моисеева и др. [4, 12—14, 56—58], а также зарубежных ученых Нейлора, Шеннона, Форрестера и др. [63, 76, 77, 81, 89, 91—93], послужила отправной точкой для построения проблемно-ориентированных математических моделей, проведения и обработки имитационных экспериментов с моделями некоторых производственно-экономических и транспортных систем, рассмотренных в последующих главах.

Широкий диапазон применения имитационного моделирования и разнообразие решаемых задач затрудняют выработку каких-либо универсальных рекомендаций по проведению имитационных экспериментов. Не существует твердых и обоснованных правил, как формализовать задачу исследований, очертить необходимый круг переменных и параметров системы, провести эксперименты на ЭВМ и оценить их результаты.

В каждом конкретном случае построение имитационной модели основано на изучении действительного хода процессов в реальных системах и представлении их с помощью избранной системы показателей. При этом исследователю нет необходимости подгонять модель под известную схему, заранее предполагающую принадлежность модели к какому-либо специальному классу задач математического программирования. Это позволяет описывать производственно-экономический процесс как можно ближе и точнее к реальности исследованной системы показателей. Таким образом, имитационное исследование в значительной степени остается задачей, требующей творческой активности и самостоятельности экспериментатора, неординарности принимаемых решений.

Любая задача, решаемая методами имитационного моделирования, может иметь свои особенности при реализации отдельных фаз эксперимента. Однако известный опыт позволяет выделить некоторые закономерности в построении моделей и проведении имитации на ЭВМ [68].

Имитационные эксперименты с моделями производственно-экономических систем в большинстве своем требуют выполнения следующих этапов.

1. Изучение моделируемого объекта или процесса.
2. Формулировка проблемы.
3. Формализованное описание и разработка математической модели.
4. Разработка моделирующего алгоритма.
5. Составление программы для ЭВМ.
6. Оценка пригодности модели.
7. Планирование и обработка результатов эксперимента.

Следует подчеркнуть, что выполнение перечисленных этапов является обязательным для большинства имитационных экспериментов, но для некоторых реальных задач может оказаться недостаточным. Так, например, при решении задач текущего и долгосрочного планирования иногда требуется выполнение процедуры отсеивания построенных с помощью имитационной модели бесперспективных вариантов планов. При этом может потребоваться реализация такого этапа, как решение оптимизационной задачи по выбору наилучшего из построенных допустимых вариантов. Далее мы рассмотрим пример решения подобной задачи.

В процессе проведения имитационных экспериментов с моделями реальных производственно-экономических систем каждый из перечисленных этапов может оказаться далеко неравнозначным как по объему, так и по содержанию. Зачастую некоторые из этапов необходимо объединять и рассматривать как один из этапов проводимого исследования. Прежде всего это относится к этапам изучения моделируемой системы и формулировке проблемы. В один этап они объединяются при проведении имитационных экспериментов для хорошо изученных процессов и систем либо в том случае, когда проблема формулируется до начала всех проводимых исследований.

В случае, когда алгоритмизация модели не встречает технических трудностей, а также при наличии специального языка моделирования, легко описывающего исследуемый процесс, целесообразно в один этап объединить разработку моделирующего алгоритма и составления программы для ЭВМ. При построении имитационной модели с помощью вероятностных и детерминированных автоматов в один этап практически объединяется разработка математической модели и моделирующего алгоритма, которые задаются в виде ГУФП. В последующих параграфах настоящей главы подробно рассмотрим основные этапы имитационных экспериментов и возможности их объединения.

§ 2. Изучение моделируемой системы и формулировка проблемы — начальные этапы имитационных экспериментов

Изучение моделируемой системы или процесса, предшествующее имитационным экспериментам, необходимо для выявления закономерностей функционирования системы и оценки влияния на нее внешней среды. В результате изучения системы определяется ее функциональная и организационная структура и намечается основной круг задач, решаемых в процессе управления работой системы.

В каждом конкретном случае построение имитационной модели основано на изучении действительного хода процессов в системе и представлении их с помощью некоторой избранной системы показателей. Применение имитационного моделирования может оказаться плодотворным только в том случае, когда предварительно проведен обстоятельный анализ исследуемой системы, выявлены главные ее компоненты и дана удовлетворительная оценка погрешности при отбрасывании второстепенных составляющих.

Для производственно-экономических систем наиболее приемлемым и универсальным методом их изучения, позволяющим ответить на основные вопросы предварительного обследования, является экономико-статистический анализ.

Экономико-статистический анализ позволяет.

1. Выявить перемещающиеся процессы в системе, подверженные значительной степени случайным воздействиям и имеющие вероятностный характер поведения.

2. Построить законы распределения случайных величин и оценить параметры законов.

3. Определить количественные и качественные зависимости между детерминированными и случайными переменными системы в виде разного рода аналитических и регрессионных уравнений.

4. Построить экономико-статистические модели процессов, связывающие функциональными и регрессионными соотношениями входные и выходные переменные с производственно-экономическими параметрами процессов.

Следует отметить, что последний этап экономико-статистического анализа может входить составной частью в разработку математической модели — третьего этапа описанной ранее методики проведения имитационных экспериментов.

Рассмотрим некоторые примеры предварительного обследования производственно-экономических и транспортных систем. Так, выполненный авторами экономико-статистический анализ функционирования транспорта на некоторых горнообогатитель-

ных комбинатах черной металлургии позволил определить функциональную и организационную структуру карьерного транспорта, оценить взаимосвязь транспортных работ и технологических процессов добычи и транспортировки руды, а также неслучайный характер некоторых экономических и производственных показателей работы транспорта [27]. Анализ позволил установить, что существенное влияние на простои технологического оборудования и транспорта оказывает информационная нагрузка на диспетчерский персонал цеха. Простои по указанной причине для ряда карьеров горнообогатительных комбинатов, например, составляют 25—30 % всех простоев технологического оборудования и транспорта, а суммарные потери по этой причине для одного мощного карьера составляют более 1 млн. руб. в год.

Полученные результаты привели к выводу о необходимости автоматизировать основные функции и задачи диспетчерского управления карьерным транспортом, а также построить имитационную модель, позволившую наметить круг наиболее эффективных задач, подлежащих автоматизации, и выбрать для них критерии оптимальности. Законы распределения случайных величин, таких, как интервалы поступления транспортных средств на погрузку и разгрузку, длительности погрузки, разгрузки и пробега транспортных средств и др., были непосредственно использованы в имитационной модели.

Во втором примере при разработке диалоговой системы планирования агломерационного производства в черной металлургии УССР был выполнен экономико-статистический анализ влияния некоторых технико-экономических показателей на объем производства агломерата в отрасли [62]. Были построены регрессионные зависимости между текущими простоями технологических агрегатов, химическим составом исходного сырья, температурными режимами и объемом производства агломерата и показано, что существует довольно тесная корреляционная связь между перечисленными показателями.

На основании полученных результатов анализа детерминированная балансовая модель планирования была дополнена экономико-статистической моделью, что значительно повысило адекватность модели планирования реальному процессу. Имитационные эксперименты с построенной математической моделью позволили увеличить точность и эффективность принимаемых плановых решений.

Тесно переплетается с изучением моделируемой системы следующий этап имитационных экспериментов — формулировка проблемы. Вкратце данный этап можно охарактеризовать как процедуру ясного и точного изложения целей эксперимента. Эти цели формулируются обычно в виде либо вопросов, на

которые надо ответить, либо гипотез, которые надо проверить, либо воздействий, которые надо оценить.

Если имитационный эксперимент преследует цель получить ответы на конкретные вопросы, то очевидно, что в самом начале эксперимента после обследования соответствующей системы необходимо точно и детально сформулировать эти вопросы. Машинную имитацию целесообразно проводить, отвечая, например, на следующие вопросы экономического или управленческого характера. Как изменится объем производства продукции в отрасли, если часть капитальных вложений направить не на строительство новых предприятий, а на реконструкцию старых? Как влияет правильность принимаемых решений в конкретной процедуре оперативного управления на конечные экономические показатели работы производственного участка, цеха, предприятия?

Целью имитационного эксперимента может быть также проверка одной или нескольких гипотез относительно поведения сложной производственно-экономической системы. Существенно ли влияет изменение тех или иных факторов на снижение простоев оборудования и издержек производства? На увеличение объема выпуска продукции? Служит ли выбранная стратегия управления увеличению прибыли в работе отрасли?

Формулировкой проблемы как бы завершается постановочная стадия проведения имитационных экспериментов. Отметим, что перечисленные вопросы могут быть поставлены на основе результатов предварительного изучения моделируемого процесса. Хотя на часть вопросов можно получить ответы из выводов экономико-статистического анализа, однако важнейшие проблемы могут быть решены только путем дальнейших исследований методами имитационного моделирования.

§ 3. Структура формализованного описания и математической имитационной модели

Математическая модель реальной системы является абстрактным или формализованным ее описанием. Исследование математической модели можно проводить различными математическими методами, но, как отмечалось ранее, математические модели реальных производственно-экономических систем являются весьма сложными с точки зрения возможности исследования их методами математического программирования. Разработка же математической модели для целей исследования ее методами имитационного моделирования тоже весьма не простое дело и требует зачастую оригинального творческого подхода при решении реальной задачи. Как отмечает А. А. Дородницын, по-

строение математических моделей экономических процессов пока еще искусство [31].

Своеобразие и оригинальность математических моделей конкретных производственно-экономических систем, однако, не отрицают того, что им присущи некоторые общие черты. Общность моделей прежде всего относится к структурным элементам, из которых они строятся. Структура модели в математическом выражении может быть записана в наиболее общем виде так:

$$Z = F(Y, X, A), \quad (2.1)$$

где Z — выходные переменные системы, т. е. конечные результаты ее действия: производственные, экономические, социальные; Y — вектор зависимых или управляемых переменных; A — вектор независимых или управляющих переменных; X — вектор параметров системы; F — функциональные зависимости, связывающие переменные и параметры системы.

Из записи модели в общем виде (2.1) можно выделить структурные элементы, присущие практически всем математическим моделям: переменные, параметры и функциональные зависимости.

При проведении имитационных экспериментов переменные математической модели суть величины, принимающие либо случайный характер, либо детерминированный и связаны между собой определенным видом функциональной зависимости. Переменные, как указывалось ранее, могут быть независимыми или управляющими, а также внешними или управляемыми.

В отличие от переменных параметры остаются постоянными в процессе эксперимента и могут лишь меняться экспериментатором при переходе от одной серии экспериментов к другой. Например, в таком уравнении, как $x = 2^y$, x , y и 2 являются соответственно зависимой, независимой переменными и параметром.

В математических моделях производственно-экономических систем переменные объемы поставок сырья и материалов, текущие расходы на оплату, прибыль, себестоимость продукции и т. д. В качестве параметров чаще всего используются различные нормы и нормативы, директивные плановые задания по основным показателям производства.

В литературе по имитационному моделированию часто различают эндо- и экзогенные переменные. К первым относятся выходные переменные математической модели Z , а ко вторым — входные переменные X и Y , или, как иногда их называют, переменные состояния системы.

Учитывая принятую терминологию, цель имитационных экспериментов можно сформулировать как исследование поведе-

ния эндогенных переменных в зависимости от принятых значений параметров и изменения экзогенных переменных.

Построение математической модели производственно-экономической системы начинается с выбора необходимого круга независимых переменных. При выборе независимых переменных, участвующих в эксперименте и воздействующих на управляемые переменные, возникает ряд трудностей. Если таких переменных слишком мало, то модель может оказаться неадекватной реальности, если их слишком много, то из-за недостаточного объема памяти ЭВМ или сложности вычислительных процедур имитация может оказаться трудно разрешимой.

Выбор выходных (эндогенных) переменных модели, как правило, не вызывает затруднений, так как они определяются уже в процессе формулировки целей исследования. Например, если цель исследований формулируется так: «Существенно ли влияет изменение тех или иных факторов на снижение простоев оборудования и издержек производства?», то выходными переменными математической модели будут простые оборудования и издержки производства. Следует отметить, что количество входных переменных весьма существенно сказывается на объеме вычислений в процессе экспериментов. Одна дополнительная входная переменная увеличивает объем вычислений практически вдвое.

Функциональные зависимости математической модели выражают математически соотношения между параметрами и переменными исследуемой системы. Эти зависимости по своей природе являются либо детерминированными, либо стохастическими. Детерминированными зависимостями описываются процессы, в которых конечные показатели однозначно определяются параметрами и входными переменными системы. Такие зависимости выражаются в виде линейных, нелинейных, дифференциальных и интегральных уравнений.

Стохастическими зависимостями описываются процессы, в которых входные переменные принимают вероятностный характер, а конечные показатели имеют неопределенный результат. Указанные функциональные зависимости представляются в виде регрессионных уравнений, построенных на основе гипотез методами статистического анализа.

В математических моделях производственно-экономических систем функциональные зависимости разделяют обычно на целевые функции и ограничения. Структурно и математически эти зависимости могут не отличаться друг от друга, но в процессе исследований они имеют разное экономическое содержание [46].

Целевые функции или критерии — это точные математические описания целей функционирования систем и заранее сформу-

лированных проблем имитационных экспериментов. В процессе экспериментов мы обычно стремимся к достижению экстремальных численных значений целевых функций, например к достижению максимума прибыли, минимума производственных затрат и т. д. Нетрудно заметить, что в целевых функциях математически описываются зависимости между, с одной стороны, выходными (эндогенными) переменными и, с другой — параметрами и переменными состояния системы. В общем виде целевая функция может быть записана в следующем виде:

$$Z = f(C_k, x_i, y_i) \rightarrow \min(\max). \quad (2.2)$$

В качестве ограничений модели используются функциональные зависимости, связывающие управляемые переменные с параметрами и управляющими переменными, например:

$$y_j \leq f_j(a_i, x_i); \quad j \in M. \quad (2.3)$$

В соотношениях (2.2), (2.3) используются обозначения: Z , y_j — управляемые переменные; x_i — управляющие переменные; C_k , a_i — параметры модели; M — множество всех функциональных соотношений.

Функциональные соотношения (2.3) устанавливают пределы изменения управляемых переменных, т. е. являются условиями, ограничивающими распределение тех или иных средств и ресурсов, установление заданных нагрузок, плановых заданий и т. п.

В случае, когда зависимости (2.2), (2.3) детерминированы и достаточно просты, то построенная математическая модель может исследоваться известными методами математического программирования.

Примером такой модели может служить рассмотренная ранее производственно-транспортная модель планирования поставок сырья на производство чугуна. Поскольку указанная модель недостаточно адекватно описывает систему управления потоками железорудного сырья на металлургическом предприятии, в модели были реализованы дополнительно отдельные компоненты стохастической системы управления запасами и дальнейшее ее исследование проводилось методами имитационного моделирования.

Здесь следует ввести понятие компонентов или подсистем, часто встречающихся в определении элементов структуры математической модели. Понятие компонентов (подсистем) заимствовано из теории сложных систем, где под ними понимаются составные части, которые при соответствующем объединении образуют систему. Система определяется как совокупность объектов или процессов, функционально и информационно

связанных между собой и объединенных некоторой формой регулярного взаимодействия для выполнения заданной функции.

Построение математической модели сложной производственно-экономической системы, охватывающей математическими соотношениями все аспекты ее функционирования, часто оказывается практически невозможным. В этих случаях по некоторым принципам производится декомпозиция исследуемого объекта на ряд подсистем при сохранении функциональных и информационных связей между ними.

Не вдаваясь подробно в основные принципы декомпозиции и последующего агрегирования систем, отметим, что построение математических моделей для выделенных подсистем значительно упрощается. Указанные модели являются компонентами математической модели сложной системы, и вся проблема заключается лишь в построении взаимодействия компонентов.

Задача разделения математической модели на компоненты и организации их взаимодействия является далеко не тривиальной. Так, например, в [34] для математического описания сложной экономической системы предлагается разделить ее на два уровня: производственно-технологический и социально-экономический.

На первом уровне описываются производственные возможности исследуемых систем. При этом систему разбивают на отдельные «элементарные» производственные единицы. После этого с помощью производственных функций различных типов описываются, во-первых, производственные возможности каждой из единиц, во-вторых, возможности обмена ресурсами и продукцией между ними. Очевидно, что такие описания являются компонентами математической модели. При описании взаимодействия между компонентами модели главную роль играют балансовые соотношения. В некоторых случаях при описании данного уровня системы могут быть применены методы автоматного моделирования.

Несколько сложнее организовывается взаимодействие между компонентами модели на уровне социально-экономических процессов. На этом уровне определяется, с помощью каких управляющих воздействий реализуются производственные возможности, описанные при моделировании производственно-технологического уровня экономической системы.

Очевидно, что технологические и производственные ограничения не определяют развитие экономического процесса и существует огромное количество вариантов выполнения плановых заданий, укладывающихся в данные ограничения.

В математических моделях выделяют специальные выходные перемещения, по значениям которых определяют оптимальный или близкий к оптимальному вариант развития экономического

процесса. Эти переменные называют обычно управляющими воздействиями, или управлениями. В имитационной модели на уровне социально-экономических процессов работает механизм выбора лучших из множества допустимых управляющих воздействий. Следует подчеркнуть, что на этом уровне возникают самые серьезные трудности в решении задач координации функционирования отдельных компонентов математической модели. Вопросы определения допустимых управляющих воздействий и соответственно выбора наилучших из них тесно переплетаются с проблемами выбора целевых функций и их оптимизацией и процессе имитационных экспериментов. Отметим, что проблема сочетания имитационных моделей и известных методов оптимального программирования является одной из наиболее актуальных и наименее исследованных в теории имитационного моделирования. Имеются частные примеры применения линейного программирования при имитации распределения капиталных вложений [90], а также попытки использовать оптимизационные методы в имитации отраслевого управления [70, 86]. В [4] предложен подход для решения задачи оптимального проектирования с помощью автоматных моделей. Предполагается, что с помощью последних можно получить значения целевой функции для любых совокупностей значений управляющих переменных. Некоторые примеры решения проблемы выбора критериев оптимальности и взаимодействия отдельных компонентов имитационных моделей с оптимизационными задачами будут рассмотрены в последующих главах настоящей книги.

§ 4. Разработка моделирующих алгоритмов

При разработке моделирующих алгоритмов возникает несколько специфических проблем, связанных с особенностями имитационных экспериментов производственно-экономических систем. В моделирующих алгоритмах практически для всех имитационных моделей можно выделить четыре необходимые процедуры.

1. Процедуры, организующие ввод исходных данных.
2. Процедуры, организующие вычислительный процесс.
3. Процедуры, генерирующие недостающие случайные переменные.
4. Процедуры, регламентирующие последовательность выполнения событий и процессов в системе.

Процедуры, реализующие ввод исходных данных и организующие вычислительный процесс, имеют место почти во всех задачах экономического характера, решаемых с помощью ЭВМ. Особенности их алгоритмов полностью определяются построением имитационной модели и их разработка в большинстве случаев принципиальных трудностей не вызывает. Мы не будем

останавливаться на технической стороне алгоритмизации указанных процедур, только отметим, что она достаточно подробно освещена в различных публикациях, например, в [11, 81]. Разработка алгоритмов для процедур ввода исходных данных и организации вычислительного процесса тесно переплетается с разработкой машинных программ, в частности с вопросами выбора языков программирования, которые подробно рассмотрены в следующем параграфе.

Процедура генерации недостающих случайных переменных — это особенность, характерная для алгоритмов имитационного моделирования. Рассмотрим кратко некоторые методы генерирования последовательности случайных чисел. В математическом обеспечении современных ЭВМ имеются пакеты прикладных программ (ППП), реализующие получение псевдослучайных чисел для наиболее распространенных распределений. В качестве исходной совокупности случайных чисел, необходимых для генерации любого закона распределения, наиболее часто используется совокупность равномерно распределенных в интервале $[0,1]$ случайных чисел. Для данной совокупности функция плотности распределения случайной величины имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0, \\ x, & \text{если } 0 \leq x \leq 1, \\ 1, & \text{если } x \geq 1, \end{cases}$$

а математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение соответственно имеют вид $M(\beta) = \frac{1}{2}$; $\sigma(\beta) = \frac{1}{2\sqrt{3}}$.

Преимуществом совокупности равномерно распределенных в интервале $[0,1]$ чисел является то, что для ее построения не требуется больших затрат машинного времени и преобразовать ее можно достаточно просто и удобно в последовательности случайных чисел различных законов распределения.

Равномерно распределенные числа в современных ЭВМ наиболее часто генерируются с помощью датчиков псевдослучайных чисел, построенных на основе рекуррентной формулы: $\beta_{i+1} = f(\beta_i)$ при заданном β_0 . Формулы эти достаточно просты и определяются разрядной сеткой ЭВМ, для которой разрабатывается датчик. Основным недостатком таких датчиков является ограниченность количества реализации случайных чисел, поскольку неизбежно будет получено число, уже встречавшееся в последовательности.

Совокупность равномерно распределенных случайных чисел позволяет, как отмечалось выше, построить последовательность случайных чисел, распределенных по различным другим законам. Например, с помощью простой формулы, построенной на основе центральной предельной теоремы, реализуется последова-

тельность чисел, распределенных по закону, близкому к нормальному:

$$x_j = \left(\sum_{i=12(j-1)+1}^{i=12(j-1)+12} \beta_i - 6,0 \right) \sigma_x + \bar{x},$$

где $\bar{x}$ и σ_x — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение нормального распределения.

Примеры ФОРТРАН-программ и блок-схем для реализации различных законов распределения случайных величин с помощью датчика псевдослучайных чисел приведены в [10, 63].

Второй метод генерации случайных чисел, распределенных как равномерно, так и по другим законам, заключается в предпринятом построении таблиц случайных чисел. Такие таблицы обычно большого объема, поэтому их необходимо составить ипринсе, записать в память ЭВМ, а затем использовать в процессе имитации. Этот метод приобретает распространение по мере роста мощности современных ЭВМ, и в частности увеличения объема оперативной и долговременной памяти, а также скорости обращения к внешним накопителям, на которых записана таблица.

Наиболее важной и ответственной процедурой, реализуемой в алгоритме любой имитационной модели, является процедура регламентации последовательности возникновения событий и процессов и выполнения соответствующих им вычислений. Для каждой конкретной модели разработка указанной процедуры обычно требует индивидуального подхода.

Поскольку большинство имитационных моделей производственно-экономических систем призваны исследовать их поведение на некотором отрезке времени, то регламентация последовательности событий и процессов определяется тем, как организовано системное время в модели.

Рассмотрим более подробно некоторые принципы построения механизмов системного времени.

Наиболее просто регламентацию событий можно организовать в моделях непрерывного планирования, в которых под событиями понимается начало расчета очередного варианта, а конец экспериментной определяется расчетом заранее заданного количества вариантов. Аналогично регламентируются события и в простых системах массового обслуживания, где предусматривается обработка заявок (событий) в той последовательности, в которой они поступили на вход системы. Как в первом, так и во втором случае требуется минимум сведений о предыдущем событии и нет необходимости в какой-то особой координации во времени между отдельными блоками системы. Это вызвано тем, что в указанных моделях практически исключены случаи одновременного возникновения событий, а модели вариантного планирования вообще не связаны с реальным временем.

Принципы организации системного времени для данного класса моделей по аналогии с [12] назовем «принципом последовательной проработки заявок (вариантов)».

Для моделей сложных производственно-экономических систем, связанных с реальным временем, регламентация возникновения событий и процессов включает два аспекта: корректировку временной координаты в процессе имитации работы системы и обеспечение согласованности во времени действий различных блоков и подсистем.

В процессе функционирования реальных систем различные внешние воздействия, а также события внутри подсистем возникают спорадически и имеется вероятность одновременного их появления. Кроме того, процессы и действия различных подсистем взаимосвязаны, т. е. зависят от состояния других блоков системы, внешних воздействий и предыстории процесса, поэтому они должны быть скоординированы во времени и синхронизированы. Задача синхронизации значительно упрощается тем, что отдельные блоки и компоненты имитационной модели функционируют последовательно, поскольку принцип действия ЭВМ (выполнения отдельных команд) последовательный.

Предположим, что мы по какому-либо принципу скорректировали временную координату, т. е. перешли от реального, и соответственно системного времени t_i к моменту времени t_{i+1} . Учитывая состояние отдельных компонентов в предыдущий момент времени t_i , а также события и возмущения как случайные, так и детерминированные, возникшие на отрезке времени между t_i и t_{i+1} , мы последовательно рассчитываем новое состояние каждого блока и элемента модели в очередной точке временной координаты t_{i+1} . Имитация заканчивается в момент достижения очередной точкой временной координаты заранее намеченного горизонта времени T .

Остановимся подробнее на принципах корректировки временной координаты. Обычно различают два основных принципа задания системного времени: с помощью фиксированных интервалов времени и переменных, длительность которых определяется интервалом между возникновением двух следующих друг за другом событий. Эти принципы обычно называются «принцип Δt » и «принцип особых состояний». По «принципу Δt » каждое новое состояние системы рассчитывается в момент времени $t_i + \Delta t$, а по «принципу особых состояний» ситуация моделируемой системы обновляется в момент времени возникновения очередного существенного события.

Имитационные модели, реализующие реальное время, обычно подразделяют на две категории [81]:

- модели с непрерывным временем изменение состояния;
- модели с дискретным временем изменение состояния.

Примерами моделей производственно-экономических систем с непрерывным изменением состояния могут служить модели работы предприятий химической промышленности, некоторых производственных процессов в черной металлургии, например доменного и сталеплавильного. В таких моделях в качестве мер времени системного времени целесообразно использовать «принцип Δt ». Данный принцип иногда также используется в имитационных моделях, исследующих дискретные системы с большими потоками информации или значительным количеством случайных возмущений. Однако в большинстве моделей с дискретным изменением состояния чаще используется «принцип особых состояний». Примерами таких моделей служат различные модели управления строительным производством, многостаночным цехом машиностроительного производства, а также модели управления промышленным транспортом, некоторые из них будут рассмотрены далее.

Основные проблемы, решаемые в моделях с регламентацией событий по «принципу Δt », — это определение длительности фиксированного интервала. В указанных моделях, особенно для дискретных систем, численная обработка процессов и состояний производится по пакетам или множествам событий, произошедших за период от t_i до $t_i + \Delta t$. С одной стороны, этот интервал должен быть как можно меньше, чтобы исключить вероятность попадания в него нескольких существенных событий и, таким образом, избежать ложного представления об одновременности их появления. С другой стороны, уменьшение Δt приводит к существенному увеличению машинного времени эксперимента, так как значительная его часть затрачивается на отслеживание и корректировку временных интервалов.

Определяется обычно интервал Δt с учетом конкретных особенностей исследуемой системы. Для систем с непрерывным изменением состояния этот интервал выбирается как можно длиннее, но таким образом, чтобы аппроксимация проинтегрированных функций — характеристик исследуемых непрерывных процессов — дала результаты, близкие к реальным.

Для дискретных систем «принцип Δt » целесообразно применить в случае, когда события появляются регулярно и распределены во времени относительно равномерно. При этом величину Δt можно определять как среднее значение интервалов между соседними событиями.

В случае, когда события приходятся на конец интервала Δt , целесообразно строить автоматные имитационные модели.

Модели, организованные по «принципу особых состояний», имеют преимущество в том, что нет необходимости определения преобразования времени, это влияет и на продолжительность цикла моделирования, и на точность конечных результатов. Такой

принцип наиболее эффективен в моделях дискретных систем, в которых события могут не наступать длительное время, а также при их неравномерном распределении во времени и большой продолжительности.

В имитационных моделях сложных производственно-экономических систем может случиться так, что алгоритмы регламентации событий целесообразно строить на комбинации обоих принципов. Предположим, что общая структура модели строится на «принципе особых состояний», а между существенными событиями возникает большое количество второстепенных событий, например, в систему поступает большое количество сообщений с контрольно-измерительных приборов. В этом случае поведение системы между существенными событиями можно имитировать с использованием «принципа Δt ».

В заключение отметим, что на определение метода регламентации событий может оказать влияние и выбор языка моделирования при разработке машинных программ.

§ 5. Вопросы разработки программного обеспечения имитационных моделей

При написании машинной программы по разработанному моделирующему алгоритму главным вопросом является выбор языка программирования. У разработчиков программ имеются две основные возможности: выбрать какой-либо из универсальных языков или специализированный язык имитационного моделирования. Эта задача не простая, поскольку в настоящее время имеется достаточно много универсальных и специализированных языков. Так, по данным Шеннопа [81], только в США при составлении программ для имитационных моделей используется более 170 языков. Нужно отметить, что чаще всего язык, на котором стремятся составить программу, выбирается не как самый подходящий для исследуемой имитационной модели, а как самый известный для исследователя, а также при наличии соответствующего транслятора в математическом обеспечении используемой ЭВМ.

Из универсальных языков наибольшее распространение имеют языки типа ФОРТРАН, АЛГОЛ, PL/I, КОБОЛ, БЕЙСИК. Очевидно, что любую имитационную модель можно написать на одном из универсальных языков, однако специализированные языки имитационного моделирования применяются вследствие легкости, производительности и эффективности. Следует отметить, что специализированные языки, так же как и перечисленные универсальные, являются проблемно-ориентированными в отличие от машинно-ориентированных языков типа АССЕМБЛЕРА.

Универсальные языки используются для решения широкого круга разнообразных задач, например PL/I и КОБОЛ для широкого спектра экономических задач, ФОРТРАН и БЕЙСИК для решения различных технических проблем и задач управления технологическими процессами и т. д. Характеристики некоторых алгоритмических языков с точки зрения применимости их для моделирования транспортных систем достаточно подробно обсуждаются в [79]. Специализированные языки моделирования типа ДИНАМО, СИМУЛА, GPSS, СИМСКРИПТ и другие используются только при решении определенного класса задач имитационного моделирования.

Под специализированным языком в данном случае понимается язык программирования, обладающий некоторыми специфическими чертами, полезными при проведении имитационных экспериментов для определенного класса моделей. Например, язык СИМУЛЕЙТ был разработан прежде всего для имитации бытовых экономических систем, описываемых значительным числом уравнений. Языки GPSS и СИМСКРИПТ особенно хорошо приспособлены для задач массового обслуживания [37], а язык ДИНАМО был разработан и успешно применен для исследования динамики поведения крупных социальных систем [76]. Для имитации производственных систем дискретного типа разработаны языки GASP и SLAM [17, 95].

Основными преимуществами языков, созданных для имитации на ЭВМ, является то, что они значительно снижают трудоемкость программирования, не требуя от составителя программы высокой квалификации или специальной подготовки. При этом специализированные языки обеспечивают строгое следование выбранной концепции построения имитационной модели. Наконец, эти языки могут генерировать случайные переменные; обобщивать системную регламентацию событий в модели; накапливать выходные данные и проводить их статистическую обработку.

Концептуальная направленность специализированных языков при исследовании несложных систем позволяет иногда исключить такие этапы, как построение математической модели и моделирующий алгоритм и, таким образом, значительно упростить имитационный эксперимент. Опыт применения специализированных языков показал, что имеется возможность единообразно описывать значительное число задач имитационного моделирования и при этом различать элементы одного класса программных моделей. Это позволяет с помощью универсальных или специально ориентированных языков составлять стандартные программные модули для элементов одного класса и включать их в виде микрокоманд в специализированные языки имитационного моделирования.

К основным недостаткам специализированных языков следует отнести отсутствие гибкости, особенно при исследовании сложных систем, модели которых включают элементы различных классов. Излишняя жесткость специализированных языков, а также отсутствие трансляторов в математическом обеспечении ЭВМ сильно ограничивают сферу их применения. Кроме того, чтобы сократить время программирования, нужно увеличить длительность счета на ЭВМ, а для некоторых языков и увеличить затраты на подготовку данных согласно требованиям к входным форматам.

Один из наиболее актуальных вопросов в разработке программного обеспечения имитационных экспериментов — создание универсальных автоматизированных имитационных моделей (УАИМ), описанных в [11, 13].

Совокупность программ имитации отдельных элементов, преобразованных к стандартной форме обработки и анализа результатов моделирования, а также стандартных процедур имитации, которая может быть оформлена в виде пакета прикладных программ с собственной операционной системой, управляющей имитационным экспериментом, составляют УАИМ. Единообразие математических моделей элементов некоторых классов систем, а также стандартные формы сопряжения элементов и их взаимодействие с внешней средой обеспечивает возможность построения универсальных программных модулей, включаемых в библиотеку стандартных программ УАИМ.

Использование в процессе имитационного эксперимента требует на этапах формулировки проблемы, разработки математической модели и моделирующего алгоритма выполнения процедур, связанных с преобразованием элементов модели, а также схем сопряжения к стандартному виду. Наличие пакета прикладных программ по имитации работы элементов модели и схем их сопряжения значительно упрощает этап разработки машинных программ имитационного эксперимента с моделью сложной системы.

В состав пакета прикладных программ наряду с локальной операционной системой включаются.

1. Программы формирования базы данных об объекте и о задаче.
2. Программы решения задачи имитации процесса функционирования отдельных элементов системы.
3. Программы обработки результатов имитации.
4. Программы расширения пакета.
5. Программы организации различных режимов работы пакета.

Важным достоинством УАИМ является то, что ее можно включить в состав математического обеспечения АСУ. Сопряже-

ние ее с информационным полем (базами данных) и операционной системой АСУ позволит автоматизировать подготовку исходной информации для моделирования, что значительно повысит окративность имитационного эксперимента. В этом случае АСУ будет располагать своеобразным полигоном для оценки приптов плановых решений и проверки качества управляющих икдействий на производственную систему [13].

В целом отметим, что УАИМ обладает гибкостью по сравнению со специализированными языками имитационного моделирования и применима к более широкому классу моделей сложных производственно-экономических систем. Это подтверждается опытом ее использования для агрегатных систем, т. е. производственных систем, в которых отдельные элементы описываются в виде кусочно-линейных агрегатов. Далее на примерах решения задач вариантного планирования производства металлургической продукции опишем некоторые аспекты создания УАИМ в отраслевой АСУ.

§ 6. Проверка пригодности имитационной модели

Служит место среди всех этапов имитационного эксперимента занимает проверка пригодности разработанной модели. Как известно, имитационные эксперименты с моделью сложной производственно-экономической системы — весьма дорогостоящее исследование, требующее значительных усилий разработчиков, определенных затрат материальных ресурсов и большого итрит машинного времени. Поэтому, создав имитационную модель, разработчики вполне резонно могут поставить следующие вопросы. Будут ли результаты экспериментов достоверными и убедительными для целей принятия управленческих решений и выбора наилучшей стратегии развития и функционирования системы? Насколько точны предсказания имитационной модели икчет проведения реальной системы? Ответы на эти вопросы припима дать проверка пригодности имитационной модели.

Не исключено, что на всех предыдущих этапах построения модели разработчики могут внести в нее как принципиальные, так и ричного рода технические ошибки.

Служитный путь устранения допущенных ошибок — это многократные визуальные проверки выполненных разработок на всех предшествующих стадиях эксперимента. Однако такие локальные проверки помогают устранить в основном только технические ошибки. Гораздо сложнее выявить и устранить принципиальные ошибки, которые могут существенно повлиять на пригодность имитационной модели.

На стадии обследования системы и статистического анализа такие ошибки являются следствием неверно сформулированных гипотез о законах распределения случайных величин и корреляционных связях между ними, а также неправильно построенных регрессионных зависимостях между переменными системами. Избежать указанных ошибок можно с помощью локальных проверок, многократно повторяя статистический анализ по возможности с большими объемами статистических совокупностей. Чаще всего такие ошибки выявляются при проверке пригодности модели.

Следствием допущения ошибок на стадии обследования системы могут быть принципиальные ошибки на этапе разработки математической модели. На основании данных экономико-статистического анализа зачастую решаются вопросы определения необходимого круга управляющих переменных, а также вопросы установления функциональных зависимостей, связывающих переменные и параметры математической модели.

Как отмечалось ранее, включение в модель тех или иных переменных и функциональных зависимостей между ними имеет два аспекта. С одной стороны, они должны обеспечить максимальную адекватность математической модели реальному процессу. С другой стороны, чрезмерное расширение круга переменных и соотношений приводит к значительному росту размерности модели и, как следствие, существенно увеличивает затраты на подготовку и проведение имитационного эксперимента. Отсечение второстепенных переменных и зависимостей, незачисление влияющих на адекватность модели, обычно производится по интуитивным соображениям разработчиков, основанным на опыте и знаниях исследуемой системы.

К решению вопросов отсечения переменных и зависимостей следует подходить весьма осторожно, так как здесь чаще всего и встречаются принципиальные ошибки. Очевидно, если на данном этапе пренебрегают важными переменными и функциональными соотношениями математической модели, то эти ошибки могут свести на нет все усилия разработчиков по получению достоверных данных имитационного эксперимента.

На этапе разработки моделирующего алгоритма принципиальной ошибкой может быть неправильный выбор механизма регламентации событий и процессов в модели. Однако такие ошибки в большинстве случаев несущественно сказываются на достоверности результатов имитации и могут лишь значительно увеличить затраты машинного времени на проведение эксперимента.

Ошибки в реализации датчиков случайных чисел на этапе разработки машинных программ принципиальными могут быть лишь в случае неправильно построенных ранее при экономико-

статистическом анализе системы законов распределения случайных величин.

Итак, если на этапе проверки пригодности модели разработчики не смогли выявить визуально или другими методами возможные технические и принципиальные ошибки, то ставится задача доказать отсутствие таких ошибок и подтвердить достоверность результатов, полученных с помощью имитационных экспериментов.

Какими же критериями следует пользоваться при оценке пригодности модели? Очевидно, что модели, основанные на предположениях данных и чисто гипотетических функциональных соотношениях, не проверенных эмпирически, могут содержать принципиальные ошибки и вряд ли пригодны для практического использования. Единственным критерием пригодности модели является то, что она верна и результаты имитации подтверждаются практикой функционирования системы. Другими словами, если в результате имитационного эксперимента правильно предсказываются последствия решений, реализуемых на практике, только тогда можно вынести окончательное положительное решение о пригодности модели.

Следует отметить, что проверка пригодности модели сравнением результатов практической деятельности исследуемых систем с предположениями имитационного эксперимента зачастую не представляется возможным. Прежде всего это касается моделей, имитирующих поведение систем на длительный период времени. Ожидание конца такого периода для оценки правильности принятых решений и соответственно пригодности модели почти неприемлемо.

С помощью имитационных экспериментов могут также приниматься весьма ответственные решения, особенно в области разработки стратегии развития и функционирования систем. Если нет гарантий адекватности модели исследуемому объекту, то существует большой риск во внедрении результатов экспериментов в области принятия ответственных стратегических решений.

Наиболее пригодным, хотя и не окончательным, методом проверки пригодности модели в этом случае является так называемое ретроспективное предсказание, т. е. проведение экспериментов с прошлым системы [34]. В таком эксперименте в качестве входных параметров и независимых переменных выбираются отчетные данные о работе системы за прошедший период времени. Если также есть данные о воздействиях на систему, имевших место в прошлом, то необходимо проверить, приведут ли указанные воздействия нашу модель к аналогичным последствиям.

Таким образом, количественно сравнивается поведение (траектории) исследуемых выходных переменных модели при заданных

параметрах и известных внешних воздействиях с фактическим поведением переменных по отчетным результатам функционирования системы.

Для оценки степени совпадения траекторий выходных переменных модели с фактическими данными используются обычно различные вероятностно-статистические методы и коэффициенты, такие как дисперсионный и факторный анализ, коэффициент несовпадения Тейла [74].

С помощью ретроспективного предсказания можно лишь только приблизительно оценить, в какой степени имитационная модель соответствует своему предназначению. Поскольку в прошлом рассматривалась только одна стратегия управления и данные за прошедшие годы, связанные с единственной траекторией, являющейся результатом воздействия этой стратегии, мы не можем сравнить с фактическими данными результаты расчетов по другим возможным стратегиям. Особенно это важно при применении имитации в долгосрочном планировании, где таким образом мы не сможем проверить, способна ли наша модель указать лучшую стратегию. В этом случае имеет смысл дополнить имитационную модель планирования оптимизационным блоком, позволяющим из множества вариантов планов выбрать оптимальный.

В целом следует подчеркнуть, что окончательную оценку пригодности модели можно получить только экспериментальной проверкой.

§ 7. Планирование и обработка результатов имитационного эксперимента

Главным и конечным этапом имитационного моделирования является проведение непосредственно на ЭВМ имитационного эксперимента, которое сопровождается, с одной стороны, планированием, а с другой — обработкой результатов эксперимента. Теория планирования экспериментов и методов анализа его результатов — один из важнейших разделов современной математической статистики. Ранее теория создавалась и развивалась применительно к натурным (физическим) экспериментам, а в настоящее время все более широкое применение находит в имитационном моделировании.

С помощью методов теории планирования экспериментов можно добиться значительного сокращения объема экспериментальных расчетов без ущерба для достоверности результатов моделирования. Методы теории позволяют оценить значимость влияния на результаты моделирования тех или иных воздействий внешней среды и целенаправленных изменений экспериментатором различных параметров модели.

Следует отметить, что многие аспекты применения теории планирования экспериментов в имитационном моделировании описаны недостаточно полно.

Большое внимание проблеме планирования эксперимента уделено в работах [4, 34, 63]. Различные стороны этого вопроса, а также некоторые практические результаты планирования, обработки результатов имитационных экспериментов и оценки их численности приведены в [58, 91—93]. Отметим, что все перечисленные работы основаны на классических методах планирования эксперимента, а также дисперсионного и регрессионного анализа.

В теории планирования эксперимента есть два важных понятия: фактор и реакция [61]. В зависимости от роли переменной в эксперименте она может быть как фактором, так и реакцией. Если целью эксперимента является изучение влияния какой-нибудь переменной X на переменную Y , то X является фактором, а Y — реакцией. В экспериментах с моделями экономических систем факторами являются входные (управляющие) переменные, а реакцией — выходные (управляемые). Факторы, в свою очередь, называются управляемыми, если их уровни можно целенаправленно выбирать в процессе эксперимента. Факторы называются наблюдаемыми, если их уровни измеряются или регистрируются. Довольно часто в эксперименте наблюдаемые факторы совпадают с управляемыми, однако среди первых могут быть и неуправляемые факторы, введенные в модель для повышения ее достоверности.

Факторы называются количественными, если их уровни являются числами, влияющими на реакцию. В противном случае факторы называются качественными. Примером последних могут служить правила принятия решений, стратегии управления, выбранные из множества альтернатив и т. п. Под уровнем фактора понимается его конкретное числовое или качественное значение. При многофакторном эксперименте исследуется обычно зависимость реакции от факторов при различных сочетаниях уровней.

Значительное количество таких сочетаний может оказаться весьма значительным. Так, в четырехфакторном эксперименте с моделью предприятия, имеющей шесть уровней фактора «директивные задания», пять уровней поставок сырья, пять возможных стратегий запасов сырья и 10 стратегий замены оборудования для полного факторного эксперимента потребуется $6 \times 5 \times 5 \times 10 = 1500$ комбинаций уровней фактора. Каждая из данных комбинаций требует экспериментальных исследований, т. е. проведения серии имитационных расчетов и последующей обработки. Поэтому важным вопросом в планировании эксперимента является уменьшение исследуемых сочетаний

уровней факторов. Это достигается исключением из исследуемой модели второстепенных факторов и уменьшением необходимого для рассмотрения количества уровней факторов. Однако если таким путем достичь сокращения исследуемых сочетаний уровней факторов без ущерба для адекватности модели не представляется возможным, то имеет смысл рассматривать неполные факторные планы, требующие намного меньших затрат машинного времени и не приводящие к значительным потерям информации о поведении функции реакции эксперимента. Неполные факторные планы чаще всего используются для выявления переменных, наиболее сильно влияющих на реакцию. При планировании эксперимента возникает необходимость как можно точнее определить его цель, что дает возможность наилучшим образом построить план эксперимента. Можно выделить две основные цели эксперимента:

1) найти такую комбинацию уровней факторов, при которой переменная реакция принимает минимальное и максимальное значение;

2) выяснить зависимость реакции от факторов, чтобы понять механизм, лежащий в основе изучаемого процесса.

Первая цель чаще всего преследуется при количественных уровнях факторов, когда возникает необходимость составить оптимальный план работы предприятия по максимуму производства, прибыли, реализации или по минимуму издержек и т. п. Вторая цель имеет место при выборе стратегий развития предприятия, оценке критериев управления процессом.

После того как составлен план эксперимента и эксперимент выполнен, надо обработать его результаты. Классические методы планирования эксперимента используются при обработке результатов дисперсионного и регрессионного анализов [63]. Опишем применение дисперсионного анализа на примере одного эксперимента на ЭВМ с моделью производства валовой продукции в отрасли. В этой модели исходными переменными, т. е. факторами, являются объемы капиталовложений: $G(1)$,

Таблица 2.1

Капиталовложение	Затраты на ремонт			
	$S(1)$	$S(2)$	$S(3)$	$S(4)$
$G(1)$	$V_1(1), V_1(2), \dots, V_1(N)$			
$G(2)$	...			...
$G(3)$				$V_{12}(1), V_{12}(2), \dots, V_{12}(N)$

$f(2)$, $f(3)$ и затраты на ремонт оборудования $S(1)$, $S(2)$, $S(3)$, $S(4)$, а реакцией — валовая продукция. Исходный план эксперимента состоит в получении данных (генерировании на ЭЦМ) для всех комбинаций каждого из трех уровней объема капиталовложений и четырех уровней затрат на ремонт оборудования. Такой план называется полным факторным планом для двух факторов и представляется в виде двумерной табл. 2.1. Каждая из 12 клеток таблицы содержит статистическую совокупность N наблюдений одной из 12 комбинаций объема капиталовложений и затрат на ремонт. Величина N определяется потенциально достаточно представительной выборки.

При исследовании влияния рассматриваемых факторов на реакцию возникает главный вопрос: воздействуют ли выбранные факторы на реакцию, т. е. различаются ли 12 статистических распределений в построенном плане эксперимента. Методы дисперсионного анализа позволяют ответить на эти вопросы путем сравнения выборочных средних значений и дисперсий. Для оценки значимости различий между выборочными средними обычно применяется F -критерий Стьюдента. Сравнение выборочных дисперсий между собой и с дисперсиями средних всех вариаций осуществляется с помощью F -критерия. Некоторые примеры обработки результатов имитационных экспериментов будут описаны далее, в практических реализациях имитационных исследований с моделями реальных производственно-экономических систем.

**МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ
И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

**§ 1. Модель одноканальной системы
массового обслуживания**

Некоторые проблемы, относящиеся к исследованию производственно-экономических систем, можно описывать методами теории массового обслуживания. Предметом теории массового обслуживания является разработка вероятностно-статистических методов решения задач обслуживания большого числа однородных объектов, которые в теории называются либо заявками, либо клиентами, либо требованиями [73]. В дальнейшем поток обслуживаемых единиц, независимо от их природы, мы будем называть заявками.

Заявками в исследуемых производственно-экономических системах могут быть: производственные заказы, обрабатываемые детали, заказы на ремонт приборов и агрегатов, транспортные средства под погрузку или разгрузку. Для производственных систем характерно то, что поток заявок поступает на одну или несколько станций обслуживания, которыми могут быть: обрабатывающий станок, сборочный конвейер, прокатный стан и т. д. В процессе обслуживания соблюдается определенная очередь заявок, процесс формирования которой называется иногда дисциплиной очереди заявок. Таким образом, под системой массового обслуживания понимают как совокупность заявок, поступивших на обслуживание и станций обслуживания, так и организацию очередей и самого процесса обслуживания.

Каждая станция в теории называется линией или каналом обслуживания. В зависимости от числа каналов система массового обслуживания называется одно- или многоканальной.

Для производственно-экономических задач, связанных с процессом обслуживания, большое значение имеет организация системы массового обслуживания. С точки зрения экономических критериев проблема очередей обслуживания сводится к балансированию потерь, с одной стороны, связанных с ожиданием заявки в очереди и, с другой — в связи с простым оборудованиям ввиду отсутствия заявок на обслуживание.

Простейшим примером модели массового обслуживания служит модель системы, состоящей из одного канала, на который поступают заявки, образующие простейшую очередь. Из такой

очереди обслуживается заявка с минимальным временем прибытия на вход канала.

Поскольку эта система достаточно проста и подробно исследована вероятностно-статистическими методами, мы сразу остаемся на этапе формулировки возможных целей ее исследования методами имитационного моделирования.

При исследовании моделей систем массового обслуживания обычно используется методика, предполагающая, что обслуживающая система имеет конечное число возможных вариантов ее функционирования. Для каждого варианта исследуются средние статистические характеристики системы, например средняя длительность обслуживания заявки, средний интервал времени между поступающими заявками, средняя продолжительность ожидания заявки в очереди, средние квадратические отклонения указанных показателей. Если удается сформулировать единую функцию затрат, возникающих при работе исследуемой системы, то целью исследования становится определение потерь при различных вариантах функционирования системы и выбора варианта с минимальными затратами [34]. Здесь рассмотрим случай, когда для исследуемой одноканальной системы массового обслуживания сформулирована единая функция затрат, суммирующая потери от ожидания заявками обслуживания и потери от простоя оборудования в ожидании заявок.

Для построения математической модели и моделирующего алгоритма введем некоторые обозначения. Пусть t_i — время обслуживания каналом i -й заявки. В общем случае t_i является случайной величиной, функцию распределения которой обозначим $F(t)$. Промежуток времени между появлением двух последовательных i -й и $i+1$ -й заявками обозначим τ_i , а функцию распределения случайной величины — через $F(\tau)$. Будем считать t_i и τ_i входными (управляющими) переменными.

В модели выходными (исследуемыми) переменными служат потери от ожидания заявками обслуживания и потери от простоев канала в ожидании заявок. Суммарные потери в системе при обслуживании заявок можно вычислить по формуле

$$Z = C_1 \sum_{i=1}^n \Delta t_i + C_2 \sum_{i=1}^n \Delta \tau_i, \quad (3.1)$$

где C_1 , C_2 — потери в единицу времени из-за ожидания заявками обслуживания и простоев канала соответственно; Δt_i — длительность ожидания обслуживания i -й заявки; $\Delta \tau_i$ — длительность простоя канала в ожидании поступления i -й заявки.

На рис. 3.1 показана блок-схема алгоритма имитационной модели, использующего для расчетов потерь в системе массового обслуживания функциональные соотношения (3.1).

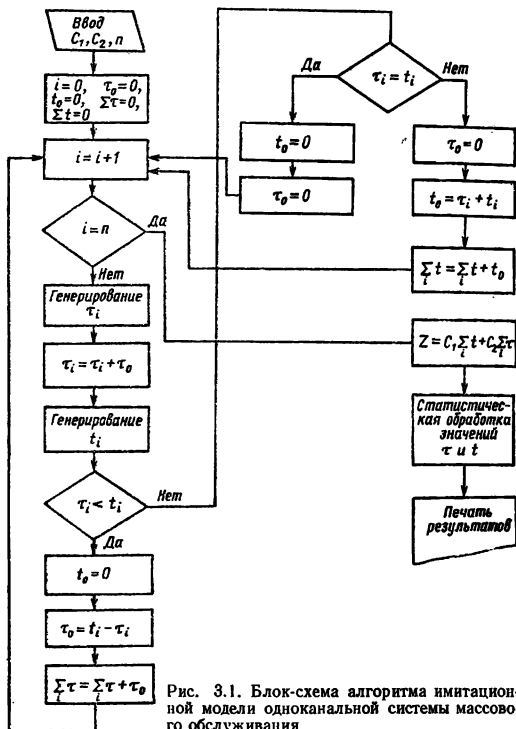


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритма имитацион-
ной модели одноканальной системы массово-
го обслуживания

В практических примерах пригодность одноканальной системы определяется с помощью экспериментов с различными функциями распределения интервала времени между заявками и продолжительностью обслуживания. Подтверждением пригодности модели служит совпадение параметров законов распределения, полученных в результате моделирования с теоретическими расчетами по известным формулам [63].

Представленная блок-схема алгоритма достаточно проста и наглядна, поэтому описывать подробно мы ее не будем. Отметим только, что в модели не предусмотрено специально организованное системное время. Очередным «особым состоянием»

служит поступление на обслуживание очередной заявки и алгоритм заканчивает работу, если обслужено заранее заданное количество n заявок. Другими словами, регламентация событий в модели организации по принципу «последовательной обработки заявок».

В результате имитационных экспериментов для реальных систем можно получить такие важные для практики результаты, как эффективная стратегия построения очереди заявок и возможности направления совершенствования работы канала обслуживания с целью снижения потерь от простоев.

В рассмотренной системе дисциплина очереди такова, что в моменты освобождения канала на обслуживание поступает заявка, прибывшая в систему раньше других, находящихся в очереди. На практике, однако, чаще встречаются системы с дисциплиной очереди с преимуществами. При такой дисциплине каждой заявке, поступившей в систему, приписывается некоторая степень важности, определяемая либо ограниченными возможностями в ожидании обслуживания, либо различной эффективностью обслуживания каждой заявки для системы в целом. При освобождении канала в таких системах обслуживается заявка, имеющая наибольшую величину приоритета обслуживания. Учет фактора приоритетности обслуживания значительно усложняет имитационную модель рассматриваемой системы, хотя основные принципы ее построения останутся неизменными.

§ 2. Численные эксперименты с моделью погрузочно-транспортного узла

С помощью предложенной выше модели можно имитировать работу погрузочно-транспортного узла. Под таким узлом в нашем примере подразумевается система, состоящая из одного погрузочно-разгрузочного механизма и потока транспортных средств, поступающих под погрузку или разгрузку. Указанный механизм подразумевается как канал системы массового обслуживания, и поток транспортных средств является потоком заявок на обслуживание.

Такие узлы достаточно часто встречаются в различных производственных объектах. Например, в угольной шахте ими служат угледобывающий комбайн и поток выкаток в забой, на железорудном карьере — экскаватор на добыче руды и поток автосамосвалов под погрузку, на металлургическом заводе — устройства разлива жидкой стали и слитков, в строительстве — подъемные краны и панелевозы под разгрузку. Следует отметить, что перечисленные узлы являются типичной частью более крупной производственной системы,

и исследовать их методами имитационного моделирования для получения практических рекомендаций в отрыве от всей системы зачастую бессмысленное занятие.

Рассматриваемый здесь пример, однако, полезен с методической точки зрения, так как позволяет изучить основные аспекты и цели имитационных экспериментов с системами массового обслуживания и в дальнейшем обобщить их на реальные системы.

В качестве объекта исследования здесь выбран погрузочно-транспортный узел карьера по добыче полезных ископаемых, состоящий из добычного экскаватора и потока автосамосвалов под погрузку. Особенностью данного узла является то, что потери от простоев экскаватора намного превышают потери от простоев транспортных средств. Такое положение вызвано тем, что экскаваторы на карьерах, и особенно на железорудных, — весьма дорогостоящие агрегаты большой единичной мощности, а соотношение экскаваторов и автосамосвалов, работающих в карьере, находится в пределах 1 : 3 — 1 : 5. Для простоты и наглядности наших экспериментов будем считать, что потери от простоев автосамосвалов и экскаваторов имеют отношение 1 : 3.

На основании предварительного обследования реального объекта получены следующие статистические данные.

1. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение длительности обслуживания экскаватором одного автосамосвала соответственно: $M_t = 4,1$ мин, $\sigma_t = 0,5$ мин.

2. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение длительности интервала между прибывающими автосамосвалами соответственно: $M_\tau = 4,3$ мин, $\sigma_\tau = 0,75$ мин.

3. Закон распределения случайной величины t — экспоненциальный, а τ — нормальный.

В экспериментах с рассматриваемой моделью системы массового обслуживания управляющими переменными или факторами служили t и τ , а в качестве выходных переменных исследовались простои экскаваторов в ожидании транспорта Z_t и простои автосамосвалов в ожидании обслуживания Z_τ . Суммарные потери от простоев $Z = 3Z_t + Z_\tau$, таким образом, являлись реакцией проводимого эксперимента, где $Z_t = \sum_i \Delta t_i$, $Z_\tau = \sum_i \Delta \tau_i$.

В первом эксперименте начальные значения управляющих переменных приняты равными исходным статистическим данным по простоям экскаватора и транспортных средств в табл. 3.1 приведены данные по одному из серии расчетов (реализаций) первого эксперимента, при $M_t^{(1)} = 4,1$ мин, $M_\tau^{(1)} = 4,3$ мин, $Z_t = 12,72$; $Z_\tau = 2,65$.

Таблица 3.1

n	t_i , мин	t_i , мин	Δt_i , мин	$\Delta \tau_i$, мин
1	5,38	3,52	5,38	0
2	5,73	4,06	1,21	0
3	4,33	4,06	0,27	0
4	3,71	3,08	0	0,72
5	5,93	4,52	2,85	0
6	2,60	4,51	0	1,93
7	4,51	3,11	0	0
8	4,71	3,96	1,60	0
9	3,23	3,99	0,73	0
10	3,31	3,86	0,68	0

Небольшой объем выборки у 10 автосамосвалов использован для наглядности в табл. 3.1, так как во всех реализациях эксперимента имитировалось поступление на погрузку 50 транспортных единиц.

По данным первого эксперимента было отмечено достаточно близкое совпадение средних и дисперсий проимитированных случайных величин t и τ с результатами статистического анализа фактических данных. На основании ретроспективного анализа был сделан вывод о пригодности построенной имитационной модели: Суммарные потери от простоев по реализации эксперимента из табл. 3.1 определяются равными $Z = 2,65 + 13 \cdot 12,72 = 40,81$ и также близки к фактическим данным.

Следующие эксперименты выполнялись исходя из предположения, что у нас имеется по крайней мере теоретическая возможность влиять на управляющие переменные модели, меняя технологию и организацию ведения работ по добыче полезных ископаемых. Например, увеличивая количество автосамосвалов, работающих в карьере, мы, естественно, увеличиваем интенсивность их поступления к экскаваторам. Таким образом, можно добиться сокращения интервала прибытия транспортных средств на погрузку.

Поскольку переменные t и τ остаются случайными величинами, можно предположить, что при изменении технологии и организации ведения добычных работ меняются параметры распределений, и в частности их математические ожидания. Очередные для эксперимента выполнены при неизменном уровне фактора t , равном: $M_t^{(1)} = 4,1$ мин и двух уровнях фактора τ : $M_\tau^{(2)} = 3,1$ и $M_\tau^{(3)} = 3,6$ мин. В табл. 3.2 и 3.3 показаны примеры реализации расчетов для каждого эксперимента, где $Z^{(2)} = 4,2$; $Z_1^{(2)} = 30,02$; $Z_2^{(2)} = 3,9$; $Z_3^{(2)} = 12,72$.

Таблица 3.2

n	τ_i , мин	t_i , мин	Δt_i , мин	$\Delta \tau_i$, мин
1	4,08	3,52	4,08	0
2	3,64	4,06	0,12	0
3	2,78	4,43	0	1,18
4	3,66	3,08	0	1,95
5	3,24	4,53	0	1,79
6	2,92	4,51	0	3,40
7	1,90	3,11	0	6,01
8	3,74	3,96	0	5,38
9	4,83	3,99	0	4,51
10	2,70	3,86	0	5,80

Таблица 3.3

n	τ_i , мин	t_i , мин	Δt_i , мин	$\Delta \tau_i$, мин
1	2,99	3,52	2,99	0
2	4,43	4,06	0,91	0
3	3,33	4,43	0	0,71
4	4,42	3,08	0	0,72
5	2,78	4,53	0	1,02
6	3,03	4,51	0	2,52
7	5,05	3,11	0	2,06
8	3,80	3,96	0	1,35
9	4,21	3,99	0	1,10
10	1,85	3,86	0	3,24

Для данных расчетов суммарные потери от простоев $Z_2 = 30,02 + 3 \cdot 4,2 = 43,62$; $Z_3 = 12,72 + 3 \cdot 3,9 = 23,42$.

В табл. 3.4 приведены значения выходных переменных Z_i и Z_τ и реакции Z для восьми реализаций в каждом эксперименте, а также их значения по всем выборкам реализации при уровне фактора t : $M_t^{(1)} = 4,2$ мин, $\delta_t = 0,5$ мин и трех уровней фактора $M_\tau^{(1)} = 4,3$, $M_\tau^{(2)} = 3,6$, $M_\tau^{(3)} = 3,1$ мин и $\sigma_\tau = 0,75$.

Следующая серия из трех экспериментов выполнялась при изменении значения фактора t : $M_t^{(2)} = 3,5$, $M_\tau^{(1)} = 4,3$; $M_\tau^{(2)} = 3,6$; $M_\tau^{(3)} = 3,1$ мин.

В табл. 3.5 представлены значения выходных переменных для второй серии экспериментов, рассчитанные аналогично значениям табл. 3.4.

Табл. 3.4 и 3.5 представляют собой полный факторный план имитационных экспериментов при двух уровнях простоев экскаваторов в ожидании транспорта, трех уровнях простоев ав-

Таблица 3.4

Помер реализации	$z^{(1)}_t$	$z^{(1)}_\tau$	z_1	$z^{(2)}_t$	$z^{(2)}_\tau$	z_2	$z^{(3)}_t$	$z^{(3)}_\tau$	z_3
1	12,82	3,65	42,11	3,90	12,72	24,42	4,20	30,02	42,62
2	13,03	3,92	43,01	3,03	20,40	29,13	3,82	31,80	43,26
3	13,50	2,80	43,30	5,96	11,35	22,07	22,95	35,44	44,29
4	10,72	4,05	36,21	2,85	16,52	25,54	1,75	29,87	35,12
5	12,60	4,22	42,02	4,08	13,30	29,23	3,64	32,40	43,32
6	9,80	5,78	35,18	3,42	14,24	24,46	5,15	25,45	40,90
7	12,24	3,11	39,83	3,71	12,51	32,64	3,80	27,79	39,1
М	11,65	6,40	41,35	2,60	15,70	23,50	4,73	22,91	37,81
$\bar{z}_t, \bar{z}_\tau, \bar{z}$	12,04	4,24	40,36	3,56	14,54	25,22	3,76	2,52	31,69

экспериментов в ожидании погрузки и восьми реализациях случайного процесса поступления транспорта на погрузку.

Для построенных реализаций случайного процесса во всех экспериментах были проведены факторный и дисперсионный анализы. С помощью t -критерия Стьюдента доказано, что гипотеза о равенстве средних значений выходных переменных для первой и второй серий из трех экспериментов не подтверждается. С помощью F -критерия доказана неправомерность нулевой гипотезы о равенстве выборочных средних по всем совокупностям случайных реализаций. Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемые мероприятия, направленные на изменение значений M_t и M_τ , существенно сказываются на простоях экспериментаторов и автосамосвалов и в конечном счете на экономических потерях от простоев исследуемого погрузочно-транспортного узла.

Таблица 3.5

Помер реализации	$z^{(1)}_t$	$z^{(1)}_\tau$	z_1	$z^{(2)}_t$	$z^{(2)}_\tau$	z_2	$z^{(3)}_t$	$z^{(3)}_\tau$	z_3
1	11,49	3,14	37,61	3,78	7,79	19,13	6,33	10,67	29,66
2	11,04	2,77	35,89	3,77	8,14	19,45	4,41	14,14	27,37
3	14,12	2,81	46,07	3,26	8,91	18,69	5,43	12,20	28,49
4	13,84	2,56	43,99	4,82	6,52	20,98	6,60	12,91	29,71
5	10,55	3,97	35,62	2,15	9,90	16,35	7,71	10,06	23,16
6	11,80	3,74	39,14	2,92	7,41	16,17	6,83	8,81	29,30
7	9,93	4,85	34,64	3,54	8,24	18,86	6,42	10,70	29,96
М	12,04	3,09	39,21	4,12	7,18	19,54	7,01	9,72	30,75
$\bar{z}_t, \bar{z}_\tau, \bar{z}$	11,87	3,37	38,98	3,54	8,02	18,64	6,22	11,15	29,81

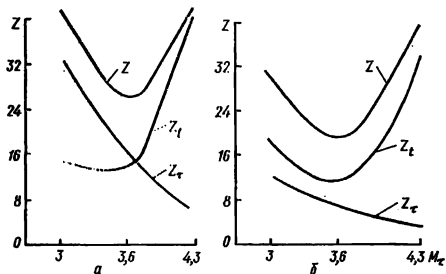


Рис. 3.2. Зависимость суммарных потерь системы от уровней факторов M_t и $M_с$:

а — при непрерывном изменении $M_с$, $M_t = 4$ и б — $M_t = 3,5$

Направления изменения выходных переменных и реакции исследуемой системы в зависимости от уровней факторов приведены на рис. 3.2. Отсюда можно заметить следующую очевидную тенденцию изменения экономических потерь системы: с ростом интенсивности поступления транспорта на погрузку снижаются потери от простоев экскаваторов и, наоборот, растут потери от простоев автосамосвалов. При этом в районе пересечения соответствующих кривых находится точка минимума суммарных потерь.

По результатам имитационных экспериментов, таким образом, можно установить оптимальную интенсивность поступления транспорта к экскаватору при известной длительности погрузки одного автосамосвала. Можно также предположить, что, выполнив аналогичные исследования для карьера в целом, мы получим оптимальное соотношение между количеством работающих экскаваторов и автосамосвалов. Результаты экспериментов будут полезны как при проектировании, так и при оперативном планировании и управлении исследуемой системы.

§ 3. Имитационная модель многофазной производственной системы массового обслуживания

Важным практическим обобщением рассмотренной выше одноканальной системы массового обслуживания служит система с одним входом и одним выходом для заявок, процесс обслуживания которых разделен на несколько последовательных фаз. Такими фазами могут быть, например, участки на сборочном

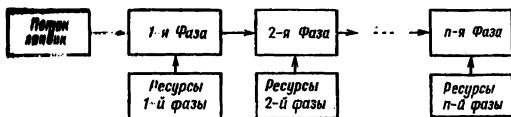


Рис. 3.3. Многофазная производственная система массового обслуживания

конвейере, станки или агрегаты различного назначения для обязательной технологической обработки однородной продукции и т. п. При этом подразумевается, что заявка проходит последовательно обслуживание на всех фазах производственного процесса (рис. 3.3).

Поскольку здесь мы рассматриваем систему в несколько идеализированном виде, не будем останавливаться на различных аспектах обследования реальных систем и формулировки проблем имитационных экспериментов. Отметим, что некоторые возможные цели моделирования в достаточно абстрактном виде мы упрощаем после формализации математической модели.

Пусть система осуществляет n -фазный процесс массового производства некоторой однородной продукции. При этом каждая фаза описывается своей производственной функцией, независимой от остальных фаз.

По j -й фазе заданы следующие показатели: Q_j — случайная величина выпуска продукции в единицу времени, а математическое ожидание которой и другие параметры закона распределения определяются уровнем использования производственных ресурсов на участке; t_j — случайная величина времени выпуска единицы продукции (обслуживания одной заявки) на j -й фазе с законом распределения $F(t_j)$, математическим ожиданием $\bar{t}_j = 1/Q_j$ и дисперсией $D(t_j)$.

Следует подчеркнуть, что величина t_j в некоторой степени управляемая и значение ее определяется уровнем использования производственных ресурсов на j -м участке. Таким образом, t_j может рассматриваться как управляющая (входная) переменная имитационной модели.

Для описания математической модели исследуемой системы по аналогии с описанной в [3] введем следующие обозначения:

t_i — промежуток времени между появлениями $i-1$ -й и i -й заявок на входе системы; t_i — длительность обработки i -й заявки на j -й фазе; Δt_{ij} — длительность ожидания очереди обслуживания i -й заявки на j -й фазе; Δt_{ij} — интервал времени, в течение которого простаивает j -я фаза в ожидании i -й заявки; Γ_{ij} — полное время пребывания i -й заявки на j -й фазе.

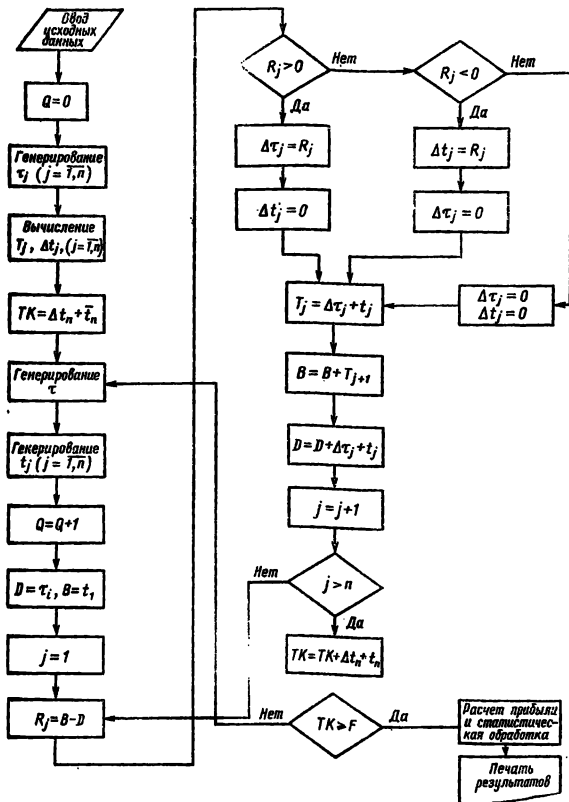


Рис. 3.4. Блок-схема алгоритма имитационной модели многофазной системы массового обслуживания

S , затраты на производство единицы продукции C , параметры распределений t_i и τ , а также количество фаз обслуживания.

В блоках 2—5 осуществляются начальные процедуры алгоритма. Заметим, что величине Q (количеству обработанных за-

явок) присваивается значение нуль, а величина T рассчитывается по формулам (3.2) — (3.5). Системное время TK определяется как сумма времени простоя и времени, затраченного на производство массового обслуживания на последней стадии.

Блок 6 генерирует промежуток времени между поступлением первой и второй заявки, а после этого в блоке 7 генерируется n новых величин затрат на производство в различных фазах. Блок 8 увеличивает количество обработанных заявок на единицу.

В блоке 9 величинам B и D присваиваются значения t_1 и τ соответственно.

Блок 10 организует цикл расчетов времени обработки заявок на всех фазах производства. Внутри цикла в блоке 11 ведется подсчет значений R_j , а в блоках 12—18 в зависимости от знака R_j рассчитываются длительности простоя оборудования j -й фазы или ожидания обслуживания в ней заявки. В блоке 19 по формулам (3.6) определяется время пребывания заявки в j -й фазе.

В блоках 20 и 21 пересчитываются величины B и D по формулам (3.7), а блоки 22 и 23 заканчивают цикл расчетов времени обработки заявок.

В блоках 24 и 25 рассчитывается новое системное время и сравнивается с концом планового периода. В случае, когда системное время превышает плановый период, прибыль определяется по формуле $\Pi = SQ - C$ и печатью результатов заканчивается работа алгоритма.

Основной целью экспериментов с описанной моделью является установление оптимальной стратегии использования производственных ресурсов на каждой фазе обработки заявок, так как этот уровень существенно влияет на длительность обработки заявок и, в конечном итоге, на суммарную прибыль работы системы. Очевидно, что получение максимальной прибыли зависит от сокращения длительности обработки заявок на всех фазах системы, и в особенности на фазах, являющихся «узкими местами». Имитационные эксперименты с построенной моделью позволяют выявить «узкие места» системы и наметить способы их устранения путем перераспределения ресурсов между производственными участками.

Второй важной целью экспериментов может быть выявление оптимальной ритмичности и интенсивности поступления заявок на вход систем.

Ритмичность интервалов между заявками и интенсивность их поступления на вход оказывают заметное влияние на конечные результаты, и в том числе на прибыль работы системы в плановый период. В классической теории массового обслуживания указанные переменные считаются независимыми (управляющи-

ми) и обычно подчиняются закону распределения Пуассона [14]. В реальных производственно-экономических системах зачастую имеется возможность управлять потоком заявок путем составления всевозможных графиков или расписаний их поступления. Другими словами, ритмичность и интенсивность становятся управляемыми переменными и появляется необходимость проводить специальные исследования по установлению их оптимальных значений.

§ 4. Многоканальная система и некоторые обобщения имитационных моделей систем массового обслуживания

Классическое описание многоканальной системы массового обслуживания выглядит следующим образом. Имеется N каналов обслуживания заявок, работающих параллельно (рис. 3.5). Прибывшие в систему заявки поступают в первый освободившийся канал в порядке обычной очередности.

Интервал времени между прибытием двух последующих заявок является случайной величиной с заданным законом распределения. Длительность также является случайной величиной, причем для каждого канала задан свой закон распределения.

После прибытия очередной заявки в систему производится поиск не занятого канала. Если такового нет, определяется время ожидания заявки в очереди до освобождения одного из каналов. С другой стороны, если какой-либо канал освободится до прибытия очередной заявки, возникает период простоя, когда бездействует канал.

В имитационной модели многоканальной системы для расчета потерь используются зависимости, аналогичные одноканальной системе. Подобным образом строится и моделирующий алгоритм, хотя он выглядит значительно сложнее за счет цикла, организующего проверку времени освобождения каналов системы. В данном случае моделирующий алгоритм несколько упрощается, если использовать при его построении метод автоматного моделирования. Автоматную модель многоканальной системы рассмотрим в следующем параграфе.

Цели имитационных экспериментов с моделью многоканальной системы массового обслуживания обычно сходны с целями исследований одноканальной и многофазной систем. В реализациях имитационных моделей многоканальной системы для реальных объектов эти цели опре-

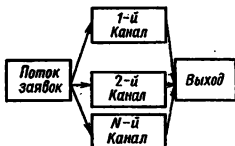


Рис. 3.5. Многоканальная система массового обслуживания

доминирует спецификой организации и функционирования последних.

Практическим примером реальной многоканальной системы местного обслуживания может служить транспортно-технологическая система, в которой поток транспортных средств обслуживается несколькими погрузочно-разгрузочными устройствами. К таким системам относятся упоминавшийся ранее горнотранспортный комплекс карьера по добыче полезных ископаемых. Аналогичные примеры встречаются в строительной индустрии при поточном строительстве, когда с одного домостроительного комбината готовые блоки и панели перевозятся одновременно на несколько строек, и в ряде других отраслей.

Все рассмотренные выше модели одноканальной, многофазной и многоканальной систем массового обслуживания являются по существу математическими схемами, которые можно использовать для имитационных экспериментов на ЭВМ с моделями реальных производственно-экономических систем. Следует отметить, что принятые для классических схем некоторые допущения при имитации реальных систем могут оказаться неприемлемыми. Прежде всего это относится к допущениям о характере потока заявок, обслуживаемых системой.

На практике реальный поток заявок недостаточно рассматривать как поток однородных событий. Наиболее типичный для производственно-экономических систем случай заключается в том, что заявки, кроме моментов времени поступления на обслуживание, характеризуются еще рядом относительно независимых и значительную случайных факторов. Эти факторы могут оказывать существенное влияние на процесс обслуживания заявок, на дисциплину очереди и в некоторых случаях на выбор канала или на распределение ресурсов в многофазных системах.

В реальных системах указанные факторы могут также существенно влиять на длительность обслуживания заявки. Например, длительность обработки детали зависит от ее размеров, твердости материала, температуры при горячей обработке и т. д.

До сих пор мы рассматривали системы массового обслуживания, в которых порядок выбора заявок из очереди, а также каналов обслуживания устанавливался заранее и не зависел от характеристик потока заявок и параметров заявок. На практике чаще встречаются системы, в которых для обслуживания выбираются заявки не в порядке их поступления, а с учетом определенных правил. Такой выбор направлен обычно на обеспечение по какому-либо критерию оптимального порядка обслуживания. Например, для обработки из очереди выбираются детали в порядке, обеспечивающем минимум переналадок станка.

При математическом описании и алгоритмизации имитационной модели такие системы можно представить как системы,

снабженные специальными алгоритмами управления, позволяющие по известным данным о заявках и состоянии обслуживающего оборудования составлять оптимальные графики обслуживания заявок, а иногда и целесообразное изменение структуры самой системы обслуживания.

§ 5. Автоматное моделирование многоканальной системы массового обслуживания

В данном параграфе мы рассмотрим автоматную модель многоканальной системы массового обслуживания, построенную по аналогии с примером автоматной модели для четырех каналов обслуживания [4].

При этом приняты допущения о дискретности промежутка времени между прибывающими на вход системы заявками и дискретности времени обслуживания заявок каждым каналом. Все эти величины являются случайными с известными законами распределения.

Обозначим τ — случайная величина длительности интервала времени прибытия двух последовательных заявок, $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$ — случайные величины длительностей обслуживания заявки 1, 2, ..., N -м каналами.

Целью имитационного исследования модели является определение потерь от простоев каналов в ожидании заявок, а также потерь от ожидания заявок обслуживания. Пусть $C_1, C_2, \dots, C_N$ — стоимости единицы времени простоя каждого канала, S — стоимость единицы времени ожидания обслуживания заявкой. Суммарные потери от простоев каналов и заявок обозначим через Z . Последняя величина в нашей модели будет служить управляемой (выходной) переменной модели.

Автоматную модель можно представить в виде системы, состоящей из $2N + 4$ автоматов $A_i (i = 1, 2N + 4)$, последние $N + 3$, из которых являются индикатором модели, т. е. автоматами, в которых ведется подсчет потерь от простоев каналов и заявок, а также значения управляемой переменной. На рис. 3.6 показан структурный граф автоматной модели. Опишем внутреннее состояние автоматов в момент времени t : $a_1(t)$ — промежуток времени от момента времени t до момента прибытия следующей заявки; $a_2(t)$ — количество заявок в очереди, ожидающих обслуживания; $a_3(t)$ — промежуток времени от момента t до времени освобождения первого канала; $a_{11}(t), \dots, a_{N+2}(t)$ — то же самое для 2-го, ..., N -го каналов; a_{N+3} — интервал от простоев первого канала в ожидании заявок; $a_{N+4}, \dots, a_{2N+2}$ — те же потери для 2-го, ..., N -го каналов; a_{2N+3} — интервал от ожидания заявками обслуживания; a_{2N+4} — сум-

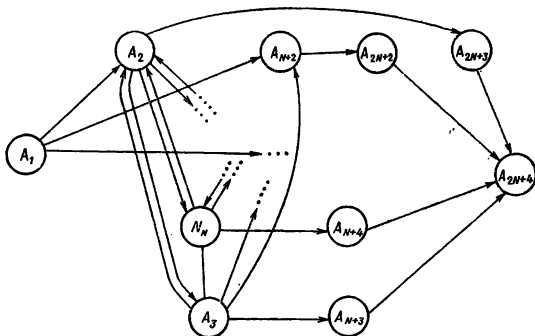


Рис. 3.6. Структурный граф автоматной модели

марные потери от простоев каналов и ожидания заявками обслуживания.

С помощью структурного графа показана качественная сторона связей между автоматами, а с помощью таблицы условных функционалов переходов (ТУФП) задаются количественные связи:

A_1	$a_1(t) > 1$		$a_1(t) = 1$
	$a_1(t+1) = a_1(t) - 1$		$a_1(t+1) = \xi_1$
A_2	J		
	$\max \left\{ 0, a_2(t) + x_{12}(t) - \sum_{j=3}^{2N+2} x_{j2} \right\}$		
$A_i, \quad i=3,4,\dots,N+2$	$a_i(t) > 1$	$a_i(t) \leq 1 \wedge x_{1i} + x_{2i} \leq 0$	$a_i(t) \leq 1 \wedge x_{1i} + x_{2i} > 0$
	$a_i(t+1) = a_i(t) - 1$	$a_i(t+1) = 0$	$a_i(t+1) = \xi_i$
$A_j, \quad j=N+3, N+4, \dots, 2N+2$	$x_j = 0$		$x_j = 1$
	$a_j(t+1) = a_j(t) + c_j$		$a_j(t+1) = a_j(t)$
A_{2N+3}	$a_1 = 1 \wedge \min \{a_2, \dots, a_{N+2}\} \geq 1$		$a_1 > 1 \wedge a_2 = 0$
	$a_{2N+3}(t+1) = a_{2N+3}(t) + a_2 S$		$a_{2N+3}(t+1) = a_{2N+3}(t)$
A_{2N+4}	J		
	$a_{2N+4}(t+1) = \sum_{j=N+3}^{2N+2} a_j(t+1) + a_{2N+3}(t+1)$		

Приведем численный пример автоматного моделирования системы при четырех каналах обслуживания. В качестве исходных данных и реализаций случайных величин используем численные

Таблица 3.6

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
1	3	8	3	6	4	0	0	0	0	6	6

Таблица 3.7

Номер входного автомата	Номер входного автомата	Функция выхода автомата	Номер выходного автомата	Номер входного автомата	Функция выхода автомата
1	2, 3, 4, 5, 6	$a_1(t) = 1$	4	2, 5, 6	$a_4(t) = 1$
2	3, 4, 5, 6	$a_2(t) = 0$	5	2, 6	$a_5(t) = 1$
3	2, 4, 5, 6	$a_3(t) = 1$	6	2	$a_6(t) = 1$

показатели примера, описанного в [4, с. 127]. Для экономической оценки управляемой переменной системы зададим следующие условные стоимости потерь: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 4$; $S = 2$.

Начальное состояние автоматов приведено в табл. 3.6.

Функции атомов заданы в табл. 3.7.

Таблица 3.8

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
1	3	8	3	6	4	0	0	0	0	6	6
3	4	7	2	5	3	0	0	0	0	14	14
2	4	6	1	4	2	0	0	0	0	22	22
1	3	5	3	3	1	0	0	0	0	28	28
1	3	5	3	3	1	0	0	0	0	28	28
2	3	4	2	2	3	0	0	0	0	34	34
1	3	3	1	1	2	0	0	0	0	40	40
1	2	2	7	2	0	0	0	0	0	44	44
3	2	1	6	1	1	0	0	0	0	48	48
2	0	4	5	8	0	0	0	0	4	48	52
1	0	3	4	7	0	0	0	0	8	48	56
4	0	2	3	6	1	0	0	0	8	48	56
3	0	1	2	5	0	0	0	0	12	48	60
2	0	0	1	4	0	4	0	0	16	48	68
1	0	0	0	3	0	8	4	0	20	48	80
1	0	9	0	2	0	8	8	0	24	48	88
3	0	8	1	1	8	8	8	0	24	48	88
2	0	7	10	0	7	8	8	4	24	48	92
1	0	6	9	0	6	8	8	8	24	48	96
1	0	5	8	10	5	8	8	8	24	48	96
1	1	4	7	9	4	8	8	8	24	50	98
2	2	3	6	8	3	8	8	8	24	54	102

Здесь в первой графе таблицы 3.7 помещены номера автоматов, издающих сигнал, во второй — номера автоматов, принимающих этот сигнал, в третьей — условие, при котором этот сигнал равен 1. Для остальных сигналов, значения которых состоят из более чем одного уровня, предполагается, что они совпадают с состоянием соответствующих автоматов.

В процессе имитации получены следующие реализации случайных величин $\xi_1 = 3, 2, 1, 3, 4, 1, 3, 1, 1, 2, 3, 1, 3, 1, 3, 2, \dots$; $\xi_2 = 8, 4, 9, 4, 1, 6, \dots$; $\xi_3 = 8, 7, 11, 9, \dots$; $\xi_4 = 2, 8, 10, 5, \dots$; $\xi_5 = 3, 1, 1, 8, 6, \dots$

Результаты имитационного эксперимента для первых 20 дискретных моментов времени приведены в табл. 3.8.

Приведенный численный пример наглядно иллюстрирует возможности автоматного моделирования для унификации процесса составления математической модели исследуемой системы и ее алгоритмизации. Приведенная автоматная модель также достаточно проста и наглядна. Однако, как отмечалось ранее, в производственно-экономических системах заявки могут характеризоваться целым рядом дополнительных признаков, влияющих на дисциплину очереди заявок и на процесс их обслуживания. Учет всех этих факторов может значительно увеличить громоздкость автоматной модели или вообще потребовать построения имитационной модели, конкретно ориентированной на реальный объект.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

§ 1. Описание объекта моделирования

Опишем модели, использованные при разработке реальных АСУ карьерным транспортом и ориентированных на управление технологией добычи и транспортировки горной массы. Имитационные эксперименты с указанными моделями позволили выбрать эффективные критерии задач оптимального управления, проверить точность управляющих алгоритмов и оценить экономическую эффективность от внедрения комплекса задач оперативного управления. Проверено также влияние вариаций исходных данных на результаты решения задач оптимального планирования работы транспорта. Некоторые результаты данной главы описаны ранее в работах авторов [27, 65].

Горнотранспортный комплекс карьера по добыче полезных ископаемых является сложной системой управления. Цель его функционирования направлена на выемку полезного ископаемого и сопутствующих пород, а также транспортировку горной массы соответственно на обогатительные фабрики для дальнейшей переработки полезного ископаемого и на отвалы для складирования сопутствующих пород. Выемка осуществляется экскаваторами, которых на мощном карьере может быть несколько десятков, а транспортировка — либо автосамосвалами, либо железнодорожным транспортом, либо в их комбинации с участием конвейерного транспорта.

Далее с помощью имитационных моделей исследуется работа карьерного железнодорожного транспорта и отмечается, что полученные результаты можно обобщить на любую другую аналогичную замкнутую производственно-транспортную систему.

Пример организационно-технологической схемы функционирования железнодорожного транспорта в типичных условиях работы горнообогатительного комбината показан на рис. 4.1. Из рис. 4.1 можно заметить сходство исследуемой системы с многоканальной системой массового обслуживания. Характерной ее особенностью является двухстороннее массовое обслуживание транспортных средств. При этом обогатительные фабрики и отвалы можно считать каналами обслуживания для груженых локомотивосоставов, а экскаваторы на карьерах — для порожних.

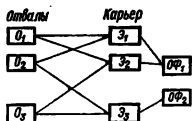


Рис. 4.1. Организационно-технологическая схема функционирования горнотранспортного комплекса карьера: $O_1, O_2, \dots, O_n$ — отвальные экскаваторы; $E_1, E_2, \dots, E_n$ — экскаваторы в карьере; $ОФ_1, ОФ_2, \dots$ — обогатительные фабрики

Говоря о сложности управления карьерным транспортом, необходимо отметить следующие особенности его функционирования.

1. Разветвленная транспортная сеть с незначительными расстояниями между пунктами погрузки и выгрузки горной массы;
2. Высокая интенсивность движения поездов по челночной схеме, достигающая 200—300 поездов в сутки через центральный диспетчерский пункт;
3. Тесная взаимосвязь работы транспорта с технологическими процессами добычи и последующей переработки руды.

На первом этапе имитационных экспериментов проводились обследование и экономико-статистический анализ функционирования транспорта на некоторых горнообогатительных комбинатах. Из результатов обследования был сделан прежде всего вывод о том, что перечисленные выше особенности предопределяют высокую сложность управления карьерным транспортом и, как следствие, значительные экономические потери, вызванные неоперативностью в принятии управленческих решений. Например, простои экскаваторов в ожидании транспорта составляют 16—20 % их рабочего времени, или 70—80 % всех простоев экскаваторов по организационным причинам [27].

Устранить указанные недостатки призваны создаваемые на многих карьерах автоматизированные системы управления карьерным транспортом. При создании последних возникает ряд трудностей, устранение которых требует дополнительных исследований, и в частности проведения имитационных экспериментов с моделями функционирования транспортных систем. В некоторых описанных ранее исследованиях с помощью имитационного моделирования устанавливался эффективный уровень автоматизации транспортных работ, а также необходимый объем информационного обеспечения АСУ карьерного транспорта [8, 47]. Цели описываемых здесь экспериментов мы рассмотрим несколько позже.

Известно, что наиболее важными и эффективными задачами, решаемыми в АСУ карьерным транспортом, являются оптимизационные задачи подсистемы оперативного управления, к которым относятся следующие [19]: а) выбор пункта назначения для порожнего состава; б) выбор пункта назначения для груженого состава; в) выбор оптимальной очередности разгрузки составов с рудой на входе обогатительной фабрики.

Задача решается при возникновении производственной ситуа-

ции, когда очередной состав закончил разгрузку на одном из конечных пунктов транспортной сети: обогатительной фабрике или отвале. Такую ситуацию можно сравнить с появлением на входе многоканальной системы массового обслуживания очередной заявки. Каналами обслуживания здесь являются экскаваторы, добывающие руду и извлекающие сопутствующую породу. При оперативном управлении ставится задача выбирать такие экскаваторы, чтобы в конечном итоге достигался максимальный эффект от работы всего горнотранспортного комплекса.

Аналогично для ситуации, когда состав окончил погрузку, решается задача управления «б», где в качестве выбираемого конечного пункта (канала обслуживания) служат приемные склады обогатительных фабрик или отвальные экскаваторы.

Отметим, что при решении задач «а» и «б» конечные пункты погрузки и выгрузки могут выбираться по различным критериям оптимальности, но эти критерии должны в конечном счете обеспечить максимальную эффективность работы транспорта и сопряженных технологических процессов.

Задача «в» решается в том случае, когда на входе обогатительной фабрики под разгрузкой находится более одного состава. Тогда формируется оптимальная очередь для разгрузки по критерию, учитывающему содержание полезного компонента (качество) в руде, поступающей на обогащение.

Процесс переработки руды можно рассматривать как одноканальную многофазную систему массового обслуживания, где фазами служат последовательные процессы дробления, измельчения и сепарации (выделения полезного компонента) руды. Поскольку на получение концентрата (обогащенной руды) нужного качества оказывает значительное влияние колебание качества в исходной руде, то составляется график, обеспечивающий минимальные колебания качества. Таким образом, локомotive составы могут разгружаться не в порядке их поступления, а согласно графику, обеспечивающему оптимальное содержание полезного компонента в потоке обогащенной руды.

В дальнейшем для упрощения первой части имитационных экспериментов будем предполагать, что составы на входе обогатительной фабрики разгружаются в порядке их поступления, а решению задачи «в» будет посвящен отдельный параграф. Отметим, что для имитации процесса дробления и обогащения руды можно использовать рассмотренную ранее модель многофазной системы массового обслуживания.

§ 2. Построение математических моделей задач оперативного управления карьерным транспортом

Для имитационных экспериментов построим математические модели задач выбора пунктов назначения для порожнего и груженого составов. Целью имитационных экспериментов с построенными моделями является определение наиболее эффективных критериев оптимальности задач управления, методов их решения и оценки экономической эффективности от внедрения подсистемы оперативного управления.

По результатам имитационных экспериментов оценивалось влияние различных критериев оптимальности решаемых задач на величину суммарных простоев экскаваторов в ожидании транспортного обслуживания. Последняя как бы служила интегральным критерием оптимальности функционирования горнотранспортного комплекса карьера. Для упрощения исследований задача «в» решалась только с одним критерием оптимальности, минимизирующим колебания качества руды, поступающей на обогащение, и поэтому ее влияние на интегральный критерий не рассматривалось.

Перейдем непосредственно к описанию математических моделей и алгоритмов решения задач «а» и «б» при различных критериях оптимальности. Введем следующие обозначения:

$A = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество пунктов разгрузки горной массы, из которых $A_p \subseteq A$ — подмножество пунктов разгрузки руды ($A_p \subseteq A$);

$B = \{1, 2, \dots, m\}$ — множество пунктов разгрузки горной массы, из которых B_p — множество пунктов разгрузки руды (приемных складов обогатительной фабрики $B_p \subseteq B$);

$D = \{1, 2, \dots, d\}$ — множество локомотивосоставов, используемых для перевозки горной массы, из которых D_p — множество локомотивосоставов, закрепленных по каким-либо организационным причинам за пунктами погрузки руды ($D_p \subseteq D$);

$L = \|l_{ij}\|$ — матрица расстояний между пунктами погрузки и выгрузки горной массы;

$K = \|k_{ij}\|$ — матрица плановых заданий по количеству рейсов составов между пунктами погрузки и разгрузки на отрезок времени T .

Для решения задачи «а» в процессе имитационных экспериментов использовались три критерия оптимальности: 1) обеспечение максимальной равномерности загрузки экскаваторов; 2) обеспечение минимальных простоев экскаваторов из-за отсутствия транспорта; 3) обеспечение минимальных простоев локомотивосоставов.

При решении задачи по каждому из перечисленных критериев в момент времени τ_s для s -го состава, закончившего разгрузку в j -м пункте, формируется подмножество номеров экскаваторов A , к которым может быть направлен данный состав. При этом из множества A исключаются экскаваторы, выполнившие свое производственное задание, т. е. такие, для которых $\sum_{j \in B} \hat{k}_{ij} = \sum_{j \in B} k_{ij}$. Здесь $\hat{k}_{ij}$ — количество составов, погруженных i -м экскаватором для j -го пункта разгрузки с начала планового отрезка времени T до момента τ_s .

При решении задачи по первому критерию из оставшихся экскаваторов в подмножество A включаются экскаваторы, для которых текущий коэффициент загрузки меньше планового:

$$A_s = \left\{ i / i \in A; \sum_{j \in B} \hat{k}_{ij} < \sum_{j \in B} k_{ij}; \hat{\xi}_i < \xi_i \right\},$$

где $\hat{\xi}_i = \frac{1}{\tau_s} \sum_{j \in B} \hat{k}_{ij}$; $\xi_i = \frac{1}{\tau_s} \sum_{j \in B} k_{ij}$ — текущий и плановый коэффициенты загрузки i -го экскаватора.

Из подмножества A_s в качестве адреса для s -го состава выбирается f -й экскаватор с минимальным отставанием выполнения производственного задания:

$$Z_f^{(s)} = \max_{i \in A_s} \left(\frac{\tau_s}{T} \sum_{j \in B} k_{ij} - \sum_{j \in B} \hat{k}_{ij} \right). \quad (4.1)$$

Отметим, что решение задачи «а» по первому критерию (4.1) обеспечивает максимально равномерные коэффициенты загрузки экскаваторов в течение всего планового отрезка времени T .

При решении задачи выбора пункта назначения для порожнего состава по второму критерию в момент времени τ_s вычисляется вектор $\Theta_s (\theta_{s1}, \theta_{s2}, \dots, \theta_{sn})$ прогнозируемых моментов времени прибытия s -го состава к пунктам погрузки. Здесь i -ю компоненту вектора можно вычислить по формуле:

$$\theta_{si} = \tau_s + l_{ij} / V_{cp}^{(n)},$$

где $V_{cp}^{(n)}$ — средняя скорость движения порожнего состава.

Пусть t_i — момент окончания погрузки предыдущего состава i -м экскаватором. Тогда можно сформировать подмножество $A_s \subseteq A$ экскаваторов, оканчивающих погрузку предыдущих составов раньше прогнозируемого момента времени прибытия s -го состава:

$$A_s = \left\{ i / i \in A; \sum_{j \in B} \hat{k}_{ij} < \sum_{j \in B} k_{ij}; t_i < \theta_{si} \right\}.$$

Из сформированного таким образом подмножества выбирается f -й экскаватор, для которого достигается максимум

$$Z_i^{(s)} = \max_{i \in A_s} (\Theta_{si} - t_i), \quad (4.2)$$

т. е. выбирается экскаватор, который дольше других будет простаивать в ожидании локомотивосостава. К указанному экскаватору и будет направлен s -й состав.

Решение задачи по второму критерию (4.2) обеспечивает первоочередную загрузку простаивающих экскаваторов.

Для решения задачи по третьему критерию формируется подмножество экскаваторов $A_s \subseteq A$, оканчивающих погрузку предыдущего состава позже момента времени прибытия s -го состава

$$A_s = \left\{ i/i \in A; \sum_{i \in B} \hat{k}_{ii} < \sum_{i \in B} k_{ii}; t_i > \Theta_{si} \right\}.$$

Из подмножества A_s выбирается f -й экскаватор, обеспечивающий минимальный простой s -го локомотивосостава,

$$Z_f^{(s)} = \min_{i \in A_s} (t_i - \Theta_{si}). \quad (4.3)$$

К этому экскаватору и адресуется s -й состав. Решение задачи по третьему критерию (4.3) обеспечивает в течение всего планового отрезка времени T минимальные простои составов в ожидании погрузки.

Отметим, что если s -й локомотивосостав закреплен за рудными пунктами погрузки $S \in D_p$, то при формировании подмножества A для решения задачи по любому из трех критериев номера экскаваторов выбираются из подмножества A_p .

При решении задачи выбора пункта назначения для груженого состава в процессе имитационных экспериментов использовались два критерия оптимальности: 1) обеспечение минимальных простоев локомотивосоставов в ожидании разгрузки; 2) обеспечение минимума простоев разгрузочного технологического оборудования в ожидании транспорта.

При решении задачи по первому критерию в момент времени окончания погрузки r -го состава в i -м пункте ($i \in A$) рассчитывается вектор $\Theta_r = (\Theta_{r1}, \dots, \Theta_{rm})$ прогнозируемых моментов времени прибытия r -го состава к пунктам разгрузки. При этом если $i \in A_p$, компоненты вектора Θ_r , соответствующие отвальным экскаваторам, принимаются равными $\Theta_{rj} = +\infty$; [$j \in (B \setminus B_p)$], что запрещает выбор адреса любого отвального экскаватора для состава, груженного рудой. Аналогично, если $i \in (A \setminus A_p)$, для всех $j \in B_p$ компоненты вектора Θ_r принимаются равными $A_{rj} = +\infty$, т. е. запрещается выбор приемного склада обогатительной фабрики для состава, груженного по-

родой. Все остальные компоненты вектора можно вычислить по формуле $\Theta_{rj} = \tau_r + \frac{l_{ij}}{V_{\text{ср}}^r}$, где $V_{\text{ср}}^r$ — средняя скорость движения груженого состава.

Пусть t_j — момент времени освобождения j -го пункта разгрузки. Тогда подмножество конечных пунктов, к которым можно направить r -й состав, определяется так:

$$B_r = \left\{ j | j \in B; \sum_{i \in A} \hat{k}_{ij} < \sum_{i \in A} k_{ij}; t_j \geq \Theta_{rj} \right\}.$$

Из подмножества B_r выбирается j -й пункт разгрузки, для которого достигается максимум критерия:

$$Z_j^{(r)} = \max_{j \in B_r} (t_j - \Theta_{rj}), \quad (4.4)$$

j -й пункт является адресом разгрузки r -го состава, выбор которого по критерию (4.4) обеспечивает в течение планового отрезка времени минимальные простои экскаваторов.

Решение задачи выбора пункта назначения для груженого состава по второму критерию осуществляется аналогично (4.2) с использованием обозначений, принятых при расчете критерия (4.4). Отметим, что в целях запрещения выбора адреса приемного склада обогатительной фабрики для состава, груженного породой, соответствующие значения компонентов вектора Θ , принимаются равными $\Theta_{rj} = \infty$.

§ 3. Имитационные эксперименты с моделью оперативного управления карьерным транспортом

Остановимся более подробно на алгоритмической структуре имитационной модели оперативного управления карьерным транспортом.

При технической реализации модели были использованы организационно-технологические параметры функционирования горнотранспортного комплекса Новокриворожского ГОКа, НК ГОКа, которые являются достаточно типичными для железорудных горнообогатительных комбинатов. В частности, было задано: максимальное количество пунктов погрузки горной массы — 15, максимальное количество пунктов разгрузки горной массы — 12, из них 2 пункта — приемные склады обогатительной фабрики, максимальное количество работающих локомотивных составов — 25. В качестве нормативных параметров в модель были введены производительности карьерных и отвальных экскаваторов, а также пропускные способности приемных складов. В качестве случайных переменных в модели использовались

скорости движения груженых и порожних составов, длительности обмена составов под экскаваторами, длительности погрузки и разгрузки составов. Параметры законов распределения случайных величин получены в результате статистической обработки данных хронометражных наблюдений и графиков исполненного движения на НКГОКе.

Для организации датчика системного времени при алгоритмизации имитационной модели выбран метод «особых состояний». При этом все исходные данные были объединены в массивы, каждый из которых соответствует одному конечному пункту транспортной сети. В массивы в процессе работы алгоритма заносится информация, характеризующая текущее состояние конечных пунктов, например: качество и запас руды, момент освобождения экскаватора, текущие суммарные простои, выполнение плана погрузки составов и т. д. Для реализации системного времени можно организовать дополнительный массив информации, в который записываются текущие моменты освобождения (окончания погрузки или выгрузки) работающих локомотивосоставов. Очередным «особым состоянием» служит минимальный момент времени освобождения одного из локомотивосоставов.

Для перемещения выбранного таким образом состава из конечного пункта, в котором он закончил очередную производственную операцию, в конечный пункт, выбранный в результате решения одной из поставленных выше задач оперативного управления, в модели использован так называемый эстафетный метод. Согласно этому методу осуществляется перенос номера состава и всех его реквизитов (грузоподъемность, скорость движения и т. п.) из массива, соответствующего старому конечному пункту, в массив выбранного пункта погрузки — выгрузки [8].

После такого перемещения выполняется пересчет моментов времени окончания производственной операции технологическим оборудованием и локомотивосоставом в новом конечном пункте. Полученный момент времени записывается в массив «особых состояний», а затем осуществляется переход к поиску следующего состава с минимальным временем освобождения. Если момент времени, соответствующий очередному «особому состоянию», оказывается больше длительности планового отрезка времени T , модель заканчивает работу. Укрупненная блок-схема алгоритма показана на рис. 4.2.

Опишем численный пример имитационных экспериментов, в котором были выполнены серии расчетов по предложенной модели с использованием различных сочетаний критериев оптимальности задач «а» и «б». В качестве исходных данных использовались основные параметры реальной горнотранспортной

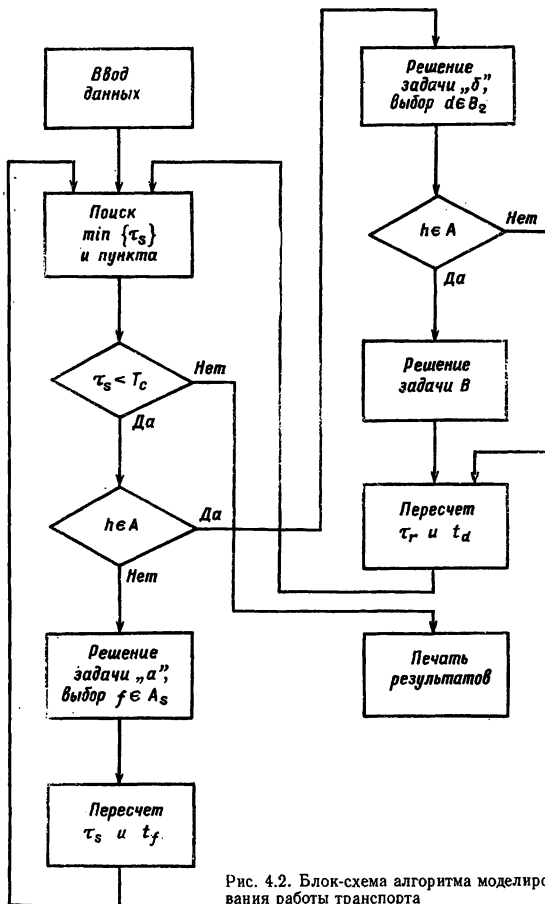


Рис. 4.2. Блок-схема алгоритма моделирования работы транспорта

Таблица 4.1

Номер серии	Задача «а» «б»		Среднее значение простоев одного состава						M_{ij} , мин	M_{ij} , %T
	x_1	x_2	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}	y_{j5}	y_{j6}		
1	1а	1б	75	79	78	72	76	72	77	10,8
2	1а	2б	87	67	86	89	88	85	86,8	12,1
3	2а	1б	83	85	91	84	82	89	85,7	11,9
4	2а	2б	82	89	89	92	95	91	89,4	12,4
5	3а	1б	92	105	94	88	87	93	91,5	12,6
6	3а	2б	90	98	93	98	96	95	95,0	13,2

системы (на примере железнодорожного транспорта НКГОКа). При этом адекватность имитационных экспериментов реальному процессу обеспечивалась как путем введения перечисленных в предыдущем параграфе параметров карьерного транспорта НКГОКа, так и фактических данных по шести отработанным сменам.

Имитация стохастического характера работы транспорта и таких переменных, как скорости движения, длительности погрузки и выгрузки и т. д., производилась с помощью датчиков случайных чисел, моделирующих различные законы распределения, из пакетов прикладных программ ЕС ЭВМ.

Согласно методике, изложенной во второй главе, эксперимент был спланирован следующим образом. Факторами эксперимента (в данном случае — качественными) можно считать критерии оптимальности задач «а» и «б», а поверхностью отклика (реакцией) — средние простои карьерных экскаваторов.

Результаты экспериментов по данному примеру приведены в табл. 4.1.

Отсюда видно, что проведено шесть параллельных экспериментов, для которых совпадали следующие данные, взятые из сменных графиков исполненного движения: фактическое количество работающих локомотивосоставов и экскаваторов, плановые и фактические объемы перевозки горной массы, фактические простои экскаваторов, локомотивосоставов и приемных складов обогатительных фабрик. Отметим, что необходимое количество параллельных экспериментов было определено с помощью формул и таблиц, приведенных в [30]. Сравнение результатов экспериментов с фактически выполненными графиками движения локомотивосоставов показывает, что внедрение в составе АСУ комплекса задач оперативного управления позволяет снизить простои карьерных экскаваторов на 5—7 %, локомотивосоставов — на 8—9 %, а простои приемных складов обогатительных фабрик на 3—4 %.

При сравнительной оценке полученных результатов с помощью F -критерия Стьюдента установлено, что разности между математическими ожиданиями простоев экскаваторов в различных сериях испытаний являются значительными. Это позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективна в данном примере оптимизация решения задачи выбора пункта назначения для порожнего состава по критерию, обеспечивающему максимальную равномерность загрузки экскаваторов, а задачи выбора пунктов назначения для груженого состава — по критерию, минимизирующему простой локомотивосоставов в ожидании разгрузки.

§ 4. Модель управления качеством перевозимого сырья

Одной из наиболее эффективных в составе комплекса задач оперативного управления карьерным транспортом является задача по выбору оптимальной очередности разгрузки составов с рудой на входе обогащательной фабрики. Указанная задача является важной задачей управления качеством руды и связана непосредственно с управлением работой усреднительных сооружений — приемных и промежуточных складов дробильной фабрики. Известно, что существует довольно тесная связь между очередностью разгрузки составов с рудой различного качества на входе обогащательной фабрики и степенью ее усреднения перед обогащением [27]. Меняя очередность разгрузки, можно добиться существенного сокращения колебаний содержания полезного компонента в руде, что весьма положительно сказывается на всех последующих переделах ее переработки.

Отметим, что ранее методами имитационного моделирования некоторыми авторами исследовались зависимости качества сырья от его усреднения путем управления грузопотоками. Результаты экспериментов позволили, например, разработать эффективную систему планирования качества угля, систему управления усреднением цементного технологического сырья и т. п. [49, 85].

Для описания алгоритма выбора оптимальной очередности разгрузки составов с рудой в нашем примере при возникновении ситуации, когда предыдущий состав окончил разгрузку, формализуем очередь составов в виде множества $F \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$. Каждому элементу множества F соответствует грузоподъемность состава $q_i = 1, 2, \dots, n$ и качество руды $\alpha_i = 1, 2, \dots, n$. Очередь F формируется из составов, уже прибывших на разгрузку, а также составов, момент времени прибытия которых на вход фабрики меньше времени окончания разгрузки предыдущего состава.

Таблица 4.2

Очередь составов, ожидающих разгрузки	Номер выбранного состава	Прогнозируемое качество руды на выходе
1, 2, 3, 0	3	23,60
1, 2, 4, 5	4	24,30
1, 2, 5, 6	1	23,94
2, 5, 6, 0	5	24,57
2, 6, 7, 8	2	24,16
6, 7, 8, 9	6	24,13
7, 8, 9, 0	9	24,10
7, 8, 10, 0	8	24,70
7, 10, 0, 0	7	24,26
10, 0, 0, 0	10	24,33

Критерием оптимальности поставленной задачи служит минимум отклонений средневзвешенного качества руды от планового. При этом средневзвешенное качество считается по руде, содержащейся в усредняющей емкости — приемном складе дробильной фабрики и в разгружаемом составе. Таким образом, мы рассчитываем прогнозируемое качество руды на выходе дробильной фабрики по формуле

$$\alpha_{f_i} = \frac{\alpha_1 q_1 + \bar{\alpha}_{f_0} Q_{f_0}}{q_1 + Q_{f_0}}, \quad (4.5)$$

где Q_{f_0} — объем руды в усредняющей емкости до начала разгрузки состава f_1 ; $\bar{\alpha}_{f_0}$ — средневзвешенное качество руды до начала разгрузки состава f_1 ; α_{f_i} — прогнозируемое качество руды в усредняющей емкости после разгрузки состава f_1 .

Состав f_1 выбирается из очереди F таким образом, чтобы достигался минимум критерия:

$$|\bar{\alpha}_{f_1} - \hat{\alpha}_s| = \min |\bar{\alpha}_{f_i} - \hat{\alpha}_s|, \quad (4.6)$$

где $\hat{\alpha}_s$ — заданное качество по i -й обогатительной фабрике.

При этом должны соблюдаться следующие ограничения: состав, который может быть выбран для разгрузки, должен обеспечить отклонение прогнозируемого качества руды от планового меньше заданного порога $\Delta\alpha_s$. Величина $\Delta\alpha_s$ определяется исходя из технологических особенностей работы конкретной обогатительной фабрики. Проверка ограничения для всех составов выполняется по формуле

$$|\bar{\alpha}_{f_i} - \hat{\alpha}_s| \leq \Delta\alpha_s \quad (i = 2, 3, \dots, n). \quad (4.7)$$

Здесь прогнозируемое качество $\bar{\alpha}_{f_i}$ рассчитывается аналогично (4.5). В случае нарушения ограничения (4.7) для какого-

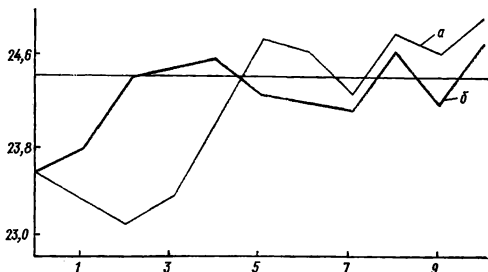


Рис. 4.3. Колебания качества руды на выходе из усредняющего склада: а — фактические результаты; б — оптимальные, полученные в результате моделирования на ЭВМ

либо состава, алгоритм исключает из очереди элемент f_1 и производит новый выбор состава f_1 по критерию (4.6). Такой поиск производится до тех пор, пока не будут удовлетворены ограничения задачи.

Описанный достаточно простой алгоритм исследовался на управляющей вычислительной машине СМ-4. Целью экспериментов была проверка адекватности модели реальному процессу и оценка эффективности решения поставленной задачи в составе автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) карьерным транспортом. Пример результатов моделирования процесса разгрузки 10 составов с рудой на входе обогачительной фабрики приведен в табл. 4.2. На рис. 4.3 показаны колебания качества руды на входе из усреднительных вкладов дробильной фабрики, полученные при разгрузке составов в порядке очередности их прибытия и в очередности, составленной управляющим алгоритмом.

Серия имитационных экспериментов на ЭВМ с реальными исходными данными позволила оценить эффективность внедрения поставленной задачи в составе АСДУ. Для условий таких комбинатов, как ЮГОК, НКГОК, экономический эффект от решения данной задачи в комплексе с задачей составления графиков перевозки руды оставит более 120 тыс. руб. в год. Отметим, что внедрение всего комплекса задач оперативного управления на мощном горнообогатительном комбинате принесет эффект более 250 тыс. руб. в год.

§ 5. Имитационное исследование оптимизационной модели планирования работы карьерного транспорта

В составе комплекса задач планирования работы карьерного транспорта важное место занимает задача расчета на смену оптимального количества рейсов локомотивосоставов на перевозке руды. Остановимся на содержательной постановке задачи в типичных условиях работы карьерного транспорта, когда для перевозки горной массы используются составы различной грузоподъемности и при этом руда перевозится с нескольких пунктов погрузки (забоев или перегрузочных складов) на одну и более обогащательную фабрику. Работа транспорта должна быть организована таким образом, чтобы кроме обеспечения бесперебойной работы технологических агрегатов — экскаваторов и дробильно-обогащательного комплекса, а также выполнения плана по объему поставок руды обеспечивалось заданное усреднение качества руды в сменном объеме поставок. Последнее условие является чисто технологическим и существенно отличает модели планирования работы карьерного транспорта от известных постановок транспортных задач общего вида.

Сформулируем поставленную задачу следующим образом. Имеется множество $M_d = \{1, 2, \dots, m_d\}$ пунктов разгрузки и множество $N_p = \{1, 2, \dots, n_p\}$ пунктов погрузки руды, а также множество $L = \{1, 2, \dots, l_p\}$ различных по грузоподъемности составов. Заданы сменные производительности экскаваторов P_{pi} ($i \in N_p$) с учетом технологических особенностей пунктов погрузки (типа экскаватора, расстояния до разминерки составов и т. п.). Отметим, что на многих карьерах по организационным и технологическим условиям некоторые составы закрепляются за отдельными пунктами погрузки руды. Закрепление составов за экскаваторами можно задать матрицей $\| \rho_{ii} \|$, в которой:

$\rho_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й состав закреплен за } i\text{-м пунктом погрузки;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$

При всех сформулированных выше условиях требуется рассчитать оптимальное количество рейсов локомотивосоставов с каждого пункта погрузки на каждый пункт разгрузки, обеспечивающих выполнение плана по объему поставок руды на каждую фабрику:

$$\sum_{i \in L} \sum_{t \in N_p} q_t k_{tis}; \quad \rho_{ii} \geq Q_s; \quad S \in M_d, \quad (4.8)$$

где k_{tis} — искомое количество рейсов составов t -й грузоподъемности, выполняемых с i -го пункта погрузки на s -ю фабрику;

q_t — грузоподъемность t -го состава; Q_s — сменный план по объему транспортировки руды на s -ю обогатительную фабрику.

Объем поставок руды с каждого пункта погрузки должен быть таким, чтобы обеспечивалось заданное качество руды на входе s -й фабрики:

$$\alpha_{\text{зад}_s} - \Delta\alpha_s \leq \frac{\sum_{t \in L} \sum_{i \in N_p} q_i k_{tis} \alpha_i \rho_{ti}}{\sum_{t \in L} \sum_{i \in N_p} q_i k_{tis} \rho_{ti}} \leq \alpha_{\text{зад}_s} + \Delta\alpha_s, \quad S \in M_d, \quad (4.9)$$

где $\alpha_{\text{зад}_s}$ — заданное качество руды, поступающей на обогащение; $\Delta\alpha_s$ — допустимые отклонения качества руды от заданного; α_i — содержание железа в руде i -го пункта погрузки.

При расчете количества рейсов учитываются ограничения на производительность экскаваторов или запаса руды (Z_{pi}) в пунктах погрузки

$$\sum_{s \in M_d} \sum_{t \in L} q_i k_{tis} \rho_{ti} \leq \min \{F_{pi}, Z_{pi}\}, \quad i \in N_p, \quad (4.10)$$

а также ограничения по парку выделенных составов:

$$\frac{1}{T_c} \sum_{s \in M_d} \sum_{i \in N_p} k_{tis} \tau_{is} \rho_{ti} \leq r_i, \quad t \in L. \quad (4.11)$$

Здесь T_c — длительность смены; τ_{is} — средняя длительность рейса состава с i -го пункта погрузки на s -ю фабрику.

При ограничениях (4.8) — (4.11) необходимо рассчитать такое количество рейсов локомотивосоставов, выполняемых в течение смены, при котором достигается минимум транспортных затрат:

$$\sum_{t \in L} \sum_{i \in N_p} \sum_{s \in M_d} C_t l_{is} j_{is} q_i \rho_{ti} \rightarrow \min, \quad (4.12)$$

где C_t — себестоимость транспортных работ для t -го типа состава; l_{is} — расстояние между i -м пунктом погрузки и входом s -й фабрики.

Отметим, что аналогично формулируются задачи планирования оптимального количества рейсов на перевозку вскрышных пород, а также оптимального прикрепления составов к пунктам погрузки или разгрузки [67].

Очевидно, что при решении задач оперативного планирования использование только нормативных показателей не всегда приводит к желаемым результатам, так как процесс функционирования горнотранспортного комплекса имеет стохастический характер. Для многих показателей, используемых при оперативном планировании на коротких промежутках времени, возможен широкий диапазон изменения.

Таблица 4.3

Маршрут движения		M_{τ} , мин	σ_{τ} , мин	V_{τ}
Экскаватор	Пункт разгрузки			
28	ОФ-1	112,1	16,0	0,143
23	ОФ-2	117,5	15,2	0,130
27	ОФ-2	114,0	17,3	0,152
3	ОФ-1	129,5	13,6	0,105
2	ОФ-1	142,4	15,8	0,111

При решении практических задач, использующих в качестве исходной экономической и технологической информации некоторые случайные параметры, целесообразно провести исследования моделей планирования на устойчивость. Такие исследования позволяют установить зависимость точности решения от колебаний исходных данных и определить необходимость решения задачи методами параметрического программирования, которые позволяют получать наиболее устойчивые решения при вариациях случайных параметров. Для этого предварительно определяются параметры, имеющие наиболее высокие коэффициенты вариации и изменение которых весьма чувствительно для модели линейного программирования [22].

Исследования на устойчивость модели планирования оптимального количества рейсов на перевозке руды методами имитационного моделирования выполнялись с использованием реальных организационно-технических параметров функционирования железнодорожного транспорта ЮГОКа. При этом авторами были рассчитаны коэффициенты вариации (V) для большинства переменных, имеющих случайный характер.

Наиболее высокие коэффициенты вариации наблюдаются для длительностей рейсов локомотивосоставов на различных маршрутах перевозки руды. Статистические показатели случайной величины τ_{is} , имеющей наибольшие значения V_{τ} , на пяти маршрутах транспортировки руды в карьере ЮГОКа приведены в табл. 4.3.

Для изучения влияния параметра τ_{is} на устойчивость модели (4.8) — (4.12) произведена серия расчетов и построено множество оптимальности, соответствующее множеству вариаций: $\tau_{is} \in \{\tau_n \pm e_i \tau_n\}$, $i \in N'_p$; $s \in M'_d$. Здесь N'_p , M'_d — множества конечных пунктов погрузки и выгрузки руды, связанные маршрутами, на которых имеют место наиболее высокие коэффициенты вариации длительностей рейсов; τ_n — нормативные длительности рейсов на указанных маршрутах.

В качестве исходной информации для получения первоначального решения задачи использовались нормативные пара-

Таблица 4.4

Вариант решения задачи	Суммарное количество рейсов составами			Транспортные затраты
	Грузоподъемность, т			
	560	595	650 + 595	
С нормативными параметрами	26,01	45,35	71,37	3120
С положительными погрешностями	27,73	44,04	71,77	3186
С отрицательными погрешностями	24,65	46,52	71,22	3074

метры и фактические данные одной из обработанных смел. Оптимальное решение, соответствующее этим исходным данным, было рассчитано на ЕС ЭВМ с помощью пакета LPS.

Транспортные затраты в найденном решении составляют $Z = 3120$ руб. Для получения устойчивого решения необходимо найти на множестве оптимальности граничные решения, а затем выбирать решения, наиболее удаленные от граничных. В описываемом эксперименте граничные решения рассчитывались для односторонних изменений параметра τ_i при максимальном значении e_i , равном: $\max e_i = \pm V_{\tau}$. В первом граничном решении

вводились отрицательные погрешности $-V_{\tau_n}$ на пяти маршрутах перевозки руды, и транспортные затраты для указанного решения получились равными: $Z = 3074$ руб., а для второго решения с положительными погрешностями $+V_{\tau_n}$ затраты составили $Z = 3186$ руб.

Общая потребность в локомотивосоставах осталась прежней, однако значительные различия наблюдались в распределении составов различных грузоподъемностей на разных маршрутах. Характерно, что в решениях менялось суммарное количество рейсов за счет изменения интенсивностей использования составов различной грузоподъемности. Результирующие данные по трем решениям приведены в табл. 4.4.

Из табл. 4.4 можно заметить, что увеличение длительностей рейсов приводит к увеличению суммарного количества рейсов на счет большего использования составов меньшей грузоподъемности, а это приводит к увеличению планируемых транспортных затрат.

Следует отметить, что наиболее удаленными от граничных решений множества оптимальности в серии имитационных экспериментов оказались решения, использующие математические ожидания случайных переменных. Эти результаты показывают, что в данном случае нет необходимости в разработке специального алгоритма параметрического программирования. Для

Таблица 4.5

Пункт погрузки	Грузоподъемность	Количество рейсов локомотивосоставов и				
		1	2	3	4	5
1-й	390	5,5	11,51	17,51	20,0	20,0
Карьер (K_1)	420	12,0	7,07	2,07	0	0
2-й	390	0	0	0	3,42	9,51
Карьер (K_2)	420	19,0	19,05	19,05	16,21	11,12
3-й	390	0	0	0	0	0
Карьер (K_3)	470	18,5	18,37	18,37	18,37	18,37
Транспортные затраты		2361	2370	2376	2382	2388
$K = K_1 + K_2 + K_3$		55	56	57	58	59

получения устойчивых решений при изменяющихся исходных параметрах достаточно иметь их математические ожидания, которые можно получить путем накопления статистического материала и соответствующей его обработки в подсистеме учета анализа и регулирования нормативов работы транспорта.

Следующая серия имитационных экспериментов с моделью (4.8) — (4.12) производилась с целью проверки предположения о зависимости транспортных затрат от суммарного количества рейсов локомотивосоставов различной грузоподъемности. В качестве исходных данных экспериментов использовались реальные результаты работы карьерного транспорта НКГОКа.

При моделировании зависимости транспортных затрат от суммарного количества рейсов в модель вводилось искусственное ограничение: $\sum_{i \in L} \sum_{l \in N_p} \sum_{s \in M_d} k_{ils} \geq \sum_{i \in L} \sum_{l \in N_p} \sum_{s \in M_d} k_{ils} + 1$.

В процессе экспериментов выполнялись расчеты по модели (4.8) — (4.12) с учетом данного искусственного ограничения. При этом полученные в результате очередного расчета значения переменных $\hat{b}_{ils}$ суммировались, затем суммарное количество рейсов $K = \sum_{i \in L} \sum_{l \in N_p} \sum_{s \in M_d} k_{ils}$ увеличивалось на единицу и производился следующий расчет. По результатам моделирования построена зависимость транспортных затрат Z от суммарного количества рейсов K (рис. 4.4). В процессе экспериментов исследовались также сравнительные показатели использования составов различной грузоподъемности в зависимости от суммарного количества рейсов. Динамика изменения показателей приведена на рис. 4.5, а в табл. 4.5 даны численные значения этих показателей. Через K_1, K_2, K_3 на рис. 4.5 обозначено количество рейсов отдельными типами составов ($K = K_1 + K_2 + K_3$). Отметим, что в процессе расчетов количество составов наименьшей грузоподъемности не ограничивалось.

различном решении			
6	7	8	9
20,0	20,0	20,0	20,0
0	0	0	0
9,51	9,51	9,51	9,51
11,12	11,12	11,12	11,12
4,57	10,27	18,37	23,87
16,30	10,10	4,50	0
2395	2401	2416	2428
60	61	62	63

Полученные результаты показывают, что с увеличением суммарного количества рейсов, необходимых для выполнения одного и того же производственного задания, планируемые транспортные затраты возрастают, причем увеличение суммарного количества рейсов и соответственно транспортных затрат происходит за счет возрастания использования составов наименьшей грузоподъемности.

Транспортные затраты также существенно зависят от использования составов на различных маршрутах транспор-

тировки горной массы. В этом смысле наиболее эффективным является использование составов повышенной грузоподъемности для перевозки горной массы с отдаленных пунктов погрузки, что необходимо учитывать в процессе управления транспортом в реальном масштабе времени. Отметим, что во всех экспериментах приводилось точное количество рейсов. Для решения задач планирования в АСУ были разработаны специальные целочисленные алгоритмы [13], погрешность которых относительно точных решений не превышает 3 %.

Результаты проведенных экспериментов показывают также, что при неправильном задании исходных данных можно получить допустимое решение, т. е. решение, удовлетворяющее основным ограничениям задачи. Такое решение, однако, может оказаться существенно неоптимальным. Ухудшение экономических показателей работы транспорта при неоптимальных решениях

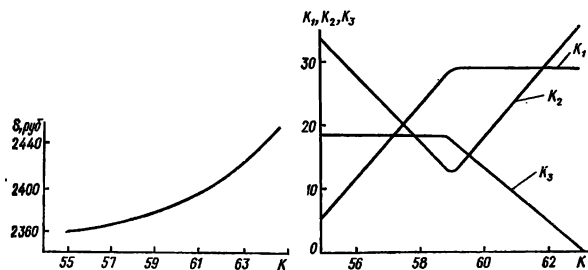
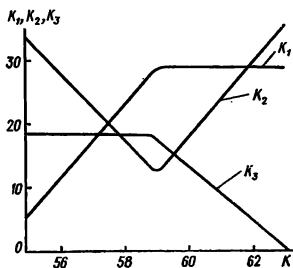


Рис. 4.4. Зависимость транспортных затрат от суммарного количества рейсов

Рис. 4.5. Динамика изменения количества рейсов локомотивосоставов различной грузоподъемности в зависимости от суммарного количества



поставленных задач планирования можно оценить на следующем примере. Ежедневное задание длительностей рейсов с положительными погрешностями (+ет) только на пяти маршрутах перевозки руды для условий ЮГОКа может увеличить суточные транспортные затраты почти на 200 руб., что приведет к потерям более 70 тыс. руб. в год. Поэтому при разработке подсистем учета, анализа и регулирования нормативов работы транспорта, а также информационных баз АСУ необходимо предусматривать статистическую обработку случайных переменных, постоянное их обновление и корректировку для целей достоверного планирования.

В заключение отметим, что результаты проведенных имитационных экспериментов можно использовать при проектировании горнотранспортных систем, в частности при выборе грузоподъемностей составов об определении необходимых транспортных коммуникаций.

§ 6. Оперативное управление автомобильным транспортом на железорудном карьере

Горнотранспортный комплекс ГТК включает пункты разгрузки, функционирующие в карьере, а также автосамосвалы, которые перевозят горную массу. Целью оперативного управления ГТК является обеспечение заданных режимов работы потребителей горной массы обогатительных фабрик и отвалов путем регулирования потоков автосамосвалов.

В зависимости от способа организации перевозки автосамосвалы закрепляются за пунктами и маршрутами (закрытый цикл) или свободно распределяются между ними (открытый цикл). Управление по открытому циклу является более эффективным и позволяет повысить производительность комплекса на 12—20 %.

При свободном распределении в ручном режиме грузопотоками управляет диспетчер, принимающий решения о выборе маршрутов движения автосамосвалов.

Внедрение АСУ позволяет автоматизировать процесс принятия таких решений, характеризующихся сложностью формализации и требующих высокой оперативности. При этом выбор маршрута осуществляется по некоторому программно реализованному алгоритму с учетом сменных заданий для каждого пункта, текущей ситуации в карьере, требований к качеству перевозимой горной массы и некоторых других факторов.

Управление комплексом усложняется действием случайных факторов: выходами из строя пунктов погрузки, разгрузки и автосамосвалов, колебаниями качества горной массы в пунк-

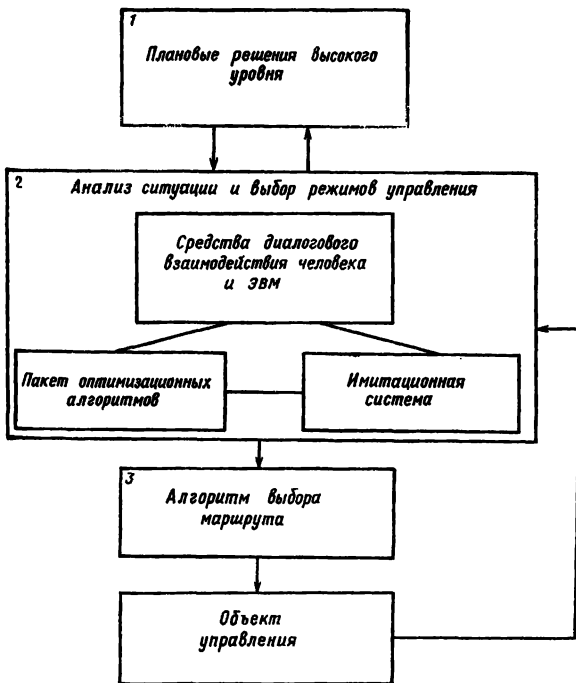


Рис. 4.6. Укрупненная функциональная структура АСУ ГТК

тих погрузки, погрешностями информационного обеспечения, неточностью выполнения решений водителями.

На рис. 4.6 показана укрупненная функциональная структура АСУ ГТК, построенная с учетом указанных особенностей и опыта практической разработки такой системы.

Сущность предлагаемого подхода заключается в следующем.

1. Выбор маршрута движения автосамосвала осуществляется автоматически по некоторому программно реализованному алгоритму (блок 3), использующему в качестве параметров характеристики режима управления, определенные на этапе анализа ситуации.

Для формализации критерия эластичности используется имитационное моделирование.

Моделирующий алгоритм для описанной выше математической модели построен по принципу последовательной проводки заявок и «особых состояний». При этом функционирование комплекса рассматривается как процесс выполнения каждым автосамосвалом последовательности рейсов, каждый из которых разбивается на ряд составных частей: проезд к пункту погрузки, ожидание погрузки у экскаватора, погрузка, проезд к пункту разгрузки, ожидание разгрузки, разгрузка.

Обработка статистических данных показала, что одноименные этапы рейсов, являясь случайными величинами, имеют одинаковые законы распределения и различаются только их параметрами для различных маршрутов. На каждом из этапов рейс может прерваться вследствие аварийного выхода из строя автосамосвала, пункта погрузки или разгрузки. Продолжительность этапов рейсов, количество аварийных остановок оборудования и другие случайные величины моделируются с помощью генераторов случайных чисел.

Информацию, обрабатываемую моделью, можно разделить на следующие основные группы.

А. Данные, характеризующие технологическую структуру ГТК: количество пунктов погрузки, разгрузки и автосамосвалов, типы оборудования, качество горной массы в пунктах погрузки.

Б. Данные, характеризующие плановые характеристики функционирования комплекса: план перевозки горной массы, требуемое качество горной массы в пунктах разгрузки и другие.

В. Данные, характеризующие функционирование ГТК во времени: деятельность имитируемого периода, данные о предусмотренных перерывах в работе оборудования, средние продолжительность этапов рейсов.

Г. Информация, характеризующая действие случайных факторов.

2. Анализ ситуации и выбор режима управления (блок 2) осуществляются в диалоговом режиме с использованием оптимизационных методов математического программирования и имитационного моделирования.

Для имитации процесса функционирования ГТК разработана математическая модель, построенная с использованием соотношений, полученных для замкнутых линейных стохастических сетей [41].

Условия функционирования комплекса, состоящего из пунктов, описываются объектом $N = \langle G, Z, T, \alpha, \beta, S \rangle$, где $G = (U_1, U_2, E)$ — двудольный ориентированный граф, в котором $U_1 = \{1, 2, 3, \dots, K_1\}$ — множество пунктов погрузки; $U_2 =$

$\equiv (K_1 + 1, K_1 + 2, \dots, K)$ — множество пунктов разгрузки, а множество дуг E определяет возможность проезда между пунктами, причем известна матрица $D = \|d_{ij}\|$ ($i = \overline{1, K}; j = \overline{1, K}$), такая, что

$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если существует дуга, связывающая } i\text{-й пункт с } j\text{-м,} \\ 0 & \text{— в противном случае;} \end{cases}$

Z — вектор пропускных способностей пунктов погрузки и разгрузки, $Z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_k)$, где z_k — максимальное количество автосамосвалов, обслуживаемое k -м пунктом за единицу времени; матрица $T = \|t_{ij}\|$ ($i = \overline{1, K}; j = \overline{1, K}$) определяет длительность проезда между пунктами; векторы $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k_1})$ и $\beta = (\beta_{k_1+1}, \beta_{k_1+2}, \dots, \beta_k)$ задают исходное качество горной массы в пунктах погрузки и требуемое усредненное качество руды в пунктах разгрузки; s — количество автосамосвалов, обслуживающих систему.

Обозначим через y_{ij} интенсивность поступления автосамосвалов из пункта i в пункт j (среднее количество автосамосвалов, прибывающих в j -й пункт из i -го за единицу времени).

Стационарным потоком будем называть матрицу такую, что

$$1) \quad y_{ij} \geq 0 \quad (i = \overline{1, K}; j = \overline{1, K}); \quad (4.13)$$

2) суммарный поток автосамосвалов, прибывающих в j -й пункт за единицу времени, равен суммарному потоку автосамосвалов, выбывающих из j -го пункта:

$$\sum_{i=1}^k y_{ij} d_{ij} = \sum_{k=1}^k y_{jk} d_{jk} \quad (j = \overline{1, K}); \quad (4.14)$$

3) суммарная интенсивность поступления автосамосвалов в j -й пункт не должна превышать пропускной способности данного пункта:

$$\sum_{i=1}^k y_{ij} d_{ij} \leq z_j \quad (j = \overline{1, K}); \quad (4.15)$$

4) усредненное качество горной массы удовлетворяет заданным ограничениям для каждого пункта разгрузки:

$$\sum_{i=1}^{K_1} (\alpha_i - \beta_j - \Delta_j^1) y_{ij} d_{ij} \leq 0 \quad (j = \overline{K_1 + 1, K}); \quad (4.16)$$

$$\sum_{i=1}^{K_1} (\alpha_i - \beta_j + \Delta_j^2) y_{ij} d_{ij} \geq 0 \quad (j = \overline{K_1 + 1, K}), \quad (4.17)$$

где Δ_j^1 и Δ_j^2 — верхние и нижние допустимые отклонения усредненного качества горной массы для j -го пункта разгрузки;

5) количество автосамосвалов, реализующих поток, не должно

применять имеющегося в наличии:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K y_{ij} d_{ij} t_{ij} + \sum_{j=1}^K \frac{1}{z_j} \sum_{i=1}^K y_{ij} d_{ij} \leq S. \quad (4.18)$$

Линейные ограничения пп. 4—9 определяют область допустимых потоков: $\Omega = \Omega(N)$.

Задача реализации выбранного потока Y решается автоматически с использованием программно реализованного алгоритма распределения автосамосвалов. Особенности разработки такого алгоритма достаточно исследованы и здесь не рассматриваются. В описываемой системе применен алгоритм, аналогичный приведенному в [20].

Более сложной задачей является выбор оптимального потока $Y \in \Omega$.

Методами линейного программирования может быть определен поток $\bar{Y}$, обеспечивающий максимальную производительность комплекса: $P(Y) \rightarrow \max_{Y \in \Omega}$,

где

$$P(Y) = \sum_{i=1}^{K_1} \sum_{j=1}^{K_2} y_{ij} d_{ij}. \quad (4.19)$$

Фактором, затрудняющим использование такого подхода, является отсутствие неопределенности, что приводит к стохастическому изменению условий функционирования комплекса.

Наиболее существенно влияет на функционирование комплекса изменение вектора Z , отражающее выход из строя и изменение производительности пунктов погрузки и разгрузки. По нашим данным для комплекса, состоящего из 25 пунктов, в течение часа в среднем происходит около 10 изменений вектора Z . Кроме этого изменяются и остальные компоненты. В таких условиях приходится постоянно корректировать выбранный поток $Y \in \Omega(N)$ в соответствии с изменениями N .

Предлагаемый нами подход состоит в выборе на каждом шаге оптимального потока, учитывающего специальный критерий эластичности, т. е. способности к корректировке данного варианта.

При разработке АСУ ГТК используются различные по функциональному назначению имитационные модули. Поэтому целесообразно использовать многоцелевую имитационную систему, ориентированную как на ЛПР, так и на разработчиков АСУ. Такая система обеспечивает возможность активного участия пользователя в процессе моделирования и применяется: а) для принятия управленческих решений; б) в качестве инструмента

исследования объекта управления; в) для обучения управленческого персонала.

Конкретный набор модулей, а также способ их использования определяются моделирующим алгоритмом в зависимости от целей имитации.

Ниже показано использование имитационной системы при оперативном управлении горнотранспортным комплексом.

Рассмотрим задачу выбора оптимального потока $Y^*(N)$ при стохастически изменяющихся условиях функционирования ГТК в течение отрезка времени $[t_0, T]$.

Пусть в моменты времени $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ такие, что $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < T$, условия функционирования комплекса дискретно изменяются: $N_0 \rightarrow N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow \dots \rightarrow N_{k-1} \rightarrow N_k$ и соответственно изменяются области допустимых потоков, определяемые ограничениями (4.13) — (4.18)

$$\Omega_0 \rightarrow \Omega_1 \rightarrow \Omega_2 \rightarrow \dots \rightarrow \Omega_{k-1} \rightarrow \Omega_k. \quad (4.20)$$

Предположим, что все множества Ω_r ($r = \overline{1, R}$) являются непустыми. Тогда для каждого Ω_r методами линейного программирования может быть определен поток $\bar{Y}^r$, обеспечивающий максимальную производительность комплекса (формула (4.19)).

Введем понятие «центральной» точки $\tilde{Y}$, для которой функция

$$f(\tilde{Y}) = \sum_{r=1}^R (t_r - t_{r-1}) \sqrt{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (\tilde{y}_{ij} - \bar{y}_{ij}^r)^2},$$

т. е. взвешенная сумма расстояний до точек $\bar{Y}^r$ ($r = \overline{1, R}$) принимает минимальное значение.

Точка $\tilde{Y}$, называемая в литературе точкой Штейнера, определяется специальными градиентными методами, приведенными в [29]. В принципе для решения подобного класса задач можно использовать известные методы, разработанные в ИК АН УССР [83].

Сущность предлагаемого метода повышения эластичности решений при выборе оптимальных потоков состоит в использовании специального критерия «близости» выбираемого потока к «центральной» точке $\tilde{Y}_1$

$$E(Y) \rightarrow \min, \text{ где} \quad (4.21)$$

$$E(Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (\tilde{y}_{ij} - y_{ij})^2}.$$

Использование такого критерия основано на предположении, что оптимальный поток, наименее удаленный от «центральной»

точки, может быть наиболее легко скорректирован при изменении условий функционирования комплекса.

Это предположение можно считать справедливым для известной траектории функционирования комплекса (4.20), которая не может быть определена заранее.

Использование имитационного моделирования позволяет генерировать возможные траектории функционирования для последующего определения «центральных» точек для каждой траектории.

Пусть с помощью имитационного моделирования сгенерировано M траекторий, для каждой из которых определена «центральная» точка $\bar{Y}^m$ ($m = \overline{1, M}$). Тогда можно определить точку Штейнера Y^{**} для точек $Y_1, Y_2, \dots, Y^M$, такую что

$$F(Y^{**}) = \sum_{m=1}^M \left| \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (y_{ij}^m - y_{ij})^2 \right|.$$

При использовании данного подхода для оперативного управления грузопотоками учитывалось, что для каждой смены можно выделить пять этапов, имеющих характерные особенности: начало смены; нормальная работа; «перерыв»; нормальная работа; завершение смены.

Для каждого из этих этапов существуют свои особенности действия случайных факторов, что находит отражение в параметрах законов распределения случайных величин. Поэтому указанным способом определяется не одна, а пять точек Штейнера $Y_1^{**}, Y_2^{**}, Y_3^{**}, Y_4^{**}, Y_5^{**}$, используемые при оценке эластичности потока.

Окончательная блок-схема алгоритма оперативного управления с применением имитационного моделирования приведена на рис. (4.7).

Определение точек $Y_1^{**} - Y_5^{**}$ производится перед началом смены. Для этого предварительно уточняются результаты, используемые при имитации данной смены (блок 1): технологическая структура ГТК; параметры законов распределения случайных величин с учетом времени года, погодных условий и т. п.

Затем (блок 2) определяются точки Штейнера для каждого этапа моделируемой смены. При этом для l -го этапа генерируется M траекторий функционирования комплекса и для каждой m -й траектории определяется «центральная» точка $\bar{Y}_l^m$, в которой достигается минимум функции $f(Y)$ [12]. Точка Штейнера для каждого этапа Y_l^{**} ($l = 1, 5$) определяется как точка, в которой достигается минимальное значение функции $F(Y)$ [16].

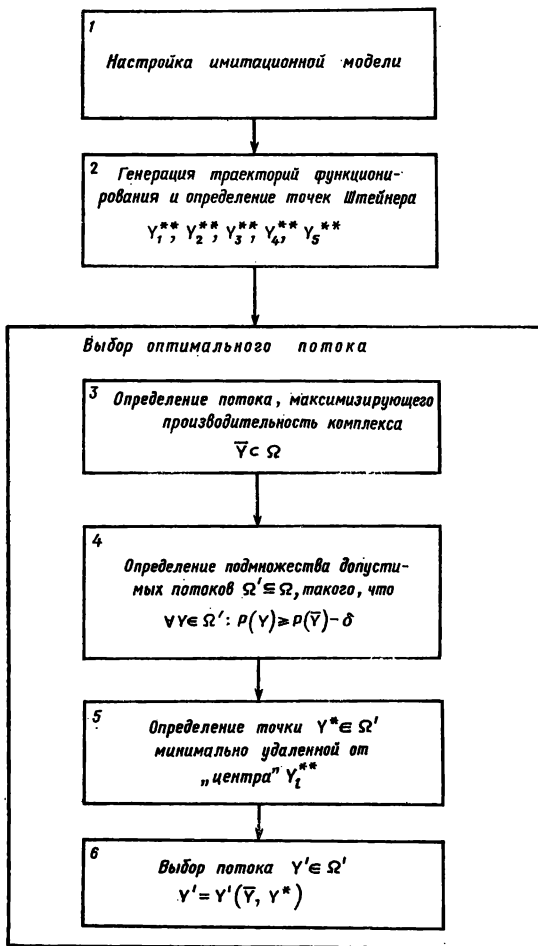


Рис. 4.7. Блок-схема оперативного управления ГТК методом имитационного моделирования

Предварительно определенные точки Y_l^{**} ($l = 1, 5$) используются при определении оптимальных потоков в течение смены следующим образом.

1. При изменении условий функционирования ГТК, вызвавшем необходимость корректировки потока, определяется поток $\bar{Y} \in \Omega$, при котором достигается максимальная производительность комплекса (блок 3).

2. После этого определяется подмножество допустимых потоков $\Omega' \subseteq \Omega$, включающее потоки Y такие, что для любого $Y \in \Omega'$ имеем $P(Y) \geq P(\bar{Y}) - \delta$, где $P(Y)$ — производительность комплекса при данном потоке Y ; δ — некоторое положительное число.

3. Методами нелинейного программирования определяется поток $Y^* \in \Omega$, наилучший по критерию эластичности (4.21): $E(Y^*) = \min_{Y \in \Omega}$, причем при определении $E(Y^*)$ используются координаты точки Штейнера для данного этапа.

4. Выбор окончательного решения Y' (блок 6) осуществляется автоматически, например: $Y' = Y^*$, или лицом, принимающим решения на основе личного опыта и значений Y^* , $\bar{Y}$, определенных автоматически.

Такая система принятия решений позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели работы ГТК.

В заключение отметим, что отдельные результаты, полученные в данном параграфе, нашли практическое применение в составе АСУ Пугачевского ГОКа, а также использованы при проектировании АСУ других ГОКов черной металлургии.

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В АСУ ПРОМЫШЛЕННЫМ ТРАНСПОРТОМ

§ 1. Общие сведения об имитационном моделировании транспортно-технологических комплексов

Рассмотрим использование имитационного моделирования при проектировании и непосредственно в составе АСУ транспортно-технологических комплексов.

Широкое распространение методы имитационного моделирования получают в решении разнообразных задач управления транспортными системами общего назначения. Здесь имитационные эксперименты особенно интенсивно применяются при проектировании АСУ промышленным транспортом, а также при решении различных задач комплексного планирования организации и управления перевозочным процессом промышленного, городского, пассажирского, строительного, морского и других видов транспорта [9, 10, 15, 38, 64].

Принимая во внимание сложность транспортно-технологических систем, тесное их взаимодействие с сопряженными технологическими процессами, высокую информационную нагрузку на диспетчерский персонал, случайный характер многих воздействий на систему, можно сказать, что вопросы создания АСУ промышленным транспортом на различных предприятиях народного хозяйства являются весьма актуальными. В условиях функционирующих АСУ, когда система снабжена достоверной информацией о состоянии транспортно-технологических работ, имитационное моделирование может стать одним из важнейших способов выбора альтернативных управляющих воздействий при различных отклонениях перевозочного процесса от нормы.

Важное место имитационные методы занимают при проектировании транспортных систем, при выборе стратегии построения и развития АСУ, состава ее технических средств, информационного обеспечения, комплекса задач и критериев управления. Отметим, что использование имитационного моделирования для решения некоторых из перечисленных вопросов мы подробно рассмотрели на примере построения АСУ карьерного транспорта. Однако специфика карьерного транспорта и особенно его непосредственное участие в технологическом процессе переработки руды существенно отличает модели управления карьерным транспортом от моделей транспортно-технологических комплексов общего назначения.

Далее мы рассмотрим основные принципы построения АСУ промышленным транспортом металлургического предприятия и некоторые примеры использования имитационного моделирования в проектировании и управлении транспортно-технологическими системами.

Характерно, что при исследовании различных транспортно-технологических систем последние зачастую рассматриваются как разновидности систем массового обслуживания. Интересно, что в таких системах потоком заявок могут служить потоки грузов или пассажиров в конечных пунктах транспортной сети, а транспортные средства и коммуникации являются каналами обслуживания. Таким способом некоторые авторы описывают системы управления городским пассажирским автотранспортом и транспортно-технологические системы перевозки строительных материалов [30, 34, 45].

С другой стороны, поток транспортных средств часто рассматривается как поток заявок на обслуживание, а технологические агрегаты и узлы и конечных пунктах транспортной сети служат каналами обслуживания. Пример такого подхода для карьерного транспорта мы рассмотрели в предыдущей главе. В целом мы отмечаем, что транспортно-технологические комплексы являются значительно более сложными по сравнению с классическими системами массового обслуживания и исследование их с помощью имитационных экспериментов в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода.

2.2. Транспорт металлургического предприятия как объект управления

Основной задачей транспорта металлургического предприятия является обеспечение и продолжение технологических процессов по выплавке металла и производства готовой металлургической продукции. Поэтому работа транспорта подчинена общей цели металлургического производства и от четкости работы транспорта зависят качественные и количественные показатели основного производства. Однако кроме определяющих факторов основной технологии при управлении железнодорожным транспортом должен учитываться ряд собственных специфических особенностей. Они касаются правильности формирования расформирования поездов, выбора маршрутов и пропуска поездов, оформления перевозок и выполнения коммерческих операций, распределения трудовых ресурсов, обеспечения подвижным составом технологических операций и др.

Для управления работой транспорта на металлургическом заводе созданы соответствующие службы, отделы и сектора, об-

ладающие собственной организационной структурой, методами и средствами управления. Регламентирующими документами для управления промышленным транспортом являются Устав железных дорог, единый технологический процесс, инструкции по СЦБ и связи, технике безопасности, различные технико-распорядительные акты и служебные инструкции.

Основным средством сбора и передачи оперативной и учетной информации являются документированные и недокументированные сообщения по каналам связи.

В железнодорожном цехе можно выделить непосредственно производство с его обслуживанием и аппарат управления. Если под аппаратом управления понимать не только коллектив работающих, но и средства, методы и используемую информацию, то с точки зрения теории управления производство является объектом управления, а аппарат — системой управления [24].

Железнодорожному транспорту металлургического завода как объекту управления присущи свои формы организации технологического процесса, своя производственная структура и система материально-производственных связей. Система управления работой транспорта характеризуется своей структурой органов управления, соответствующей системой функций и переносом информации, используемых в управлении транспортно-технологическим процессом традиционными методами.

Железнодорожный цех как система является одновременно технологическим и экономическим, социальным и психологическим объектом. Поэтому аппарат управления должен располагать различными методами воздействия на объект управления, как физическими, так и экономическими, и административными.

В целом исследуемый объект, как показывает опыт, практика и специальная литература, сложный по своему поведению состоит из огромного количества разнообразных элементов со значительным многообразием и разнородностью количественных и качественных связей между ними, с наличием большого количества стоящих перед ними частных и зачастую разноречивых целей. Причем совокупность последних должна вести к достижению общей цели функционирования транспортно-технологического комплекса.

Между объектом и системой управления происходит непрерывный обмен информацией. От объекта к системе идет информация о ходе технологического и транспортного процесса, а система передает на объект информацию об управляющих воздействиях. Эти встречные потоки циркулируют по определенным законам и в совокупности представляют собой информационное описание исследуемого комплекса.

Темпы известительной и управляющей информации при традиционных, неавтоматизированных, методах управления транс-

портом металлургического предприятия таковы, что операторы и учетные работники, а тем более диспетчеры и начальники служб получают только ограниченную агрегированную информацию и зачастую со значительным отставанием от хода технологического процесса. Указанные факты, а также значительная сложность эксплуатационных процессов, многовариантность управленческих решений и высокие требования к оперативности их принятия требуют совершенствования существующих систем управления, опираясь на применение современных средств вычислительной техники и математических методов, в том числе и имитационного моделирования, а также системного подхода при реализации этих мероприятий. Системный подход здесь характеризуется рассмотрением с единых позиций всех элементов процесса управления объектом, как внутренних, так и внешних.

Ввиду особой роли транспорта в технологии металлургического производства представляется целесообразным выделить в общей системе автоматизации управления завода автономной системы автоматизированного управления железнодорожным транспортом [25]. При этом такого рода системы должны рассматриваться как составная часть системы комплексной автоматизации диспетчерского управления основными производственными процессами металлургического завода.

§ 3. Принципы построения АСУ транспортом металлургического предприятия

Автоматизированные системы управления промышленным транспортом представляют собой сложный программно-технический комплекс. Как и большинство подобных систем, они имеют иерархическую многофункциональную структуру. На низшем уровне автоматизации главным образом осуществляется управление технологическим (перевозочным) процессом работы транспорта. Этот процесс является основным источником первичной информации. На более высоких уровнях информация агрегируется и на ее основе решаются соответствующие каждому из уровней комплексы функциональных задач.

Известно, что с точки зрения получения максимального экономического эффекта наиболее приемлемой является система комплексной автоматизации, охватывающая практически все стороны деятельности системы управления транспортом. Однако в силу ее сложности имеет смысл выделить ряд основных этапов ее разработки и внедрения. В решении вопросов этапности создания систем, а также необходимого или эффективного уровня комплексной автоматизации транспортных работ широкое применение находят методы имитационного моделирования.

Можно отметить работы [24, 82], в которых освещены различные аспекты использования имитационных экспериментов с моделями транспортных систем для проектирования АСУ промышленного транспорта.

На первых этапах разработки систем предусматривается обычно обеспечение автоматизированного сбора информации, используемой для решения разного рода информационных и учетно-статистических задач, определяющих качественную и количественную оценку управления работой транспорта. Возможности информационных систем ограничивались автоматизацией отдельных учетных функций объекта, что затрудняло решение оптимизационных задач и создание имитационных моделей в системном режиме. Отсутствие эффективной системы сбора информации в разрабатываемых АСУ приводило к разрыву во времени между событием и его отражением в системе, в результате чего значительно снижается ценность первичной информации.

Однако приобретенный опыт конкретных разработок информационных систем, современные достижения в развитии вычислительной техники и средств автоматизации позволили устранить ряд указанных недостатков и приступить к созданию более прогрессивных информационно-управляющих систем [25].

Такие системы используются для проведения расчетов, связанных с планированием и управлением работой транспорта и имеют принципиальные отличия от информационных систем по различным аспектам. К основным из них относятся: решение задачи в реальном масштабе времени, значительное расширение комплекса функциональных задач, включая задачи планирования и управления работой транспорта, решаемые методами математического программирования, имитационного моделирования, высокая надежность системы автоматического сбора информации, объединяющей большое количество датчиков и устройств, современные управляющие вычислительные комплексы, обеспечивающие работу системы в диалоговом режиме.

Важным условием реализации систем подобного класса является достаточная мощность вычислительного комплекса, который следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить обработку первичной информации в реальном масштабе времени и при этом легко решать большой комплекс задач системы в ограниченное время. Второй важной проблемой, с которой сталкиваются проектировщики АСУ, является проблема полноты и очередности решения управляющих задач. Очевидно, что ограниченность времени на их решение, а также случайность входного потока информации затрудняют, а иногда и принципиально исключают строгую последовательность выполнения программ.

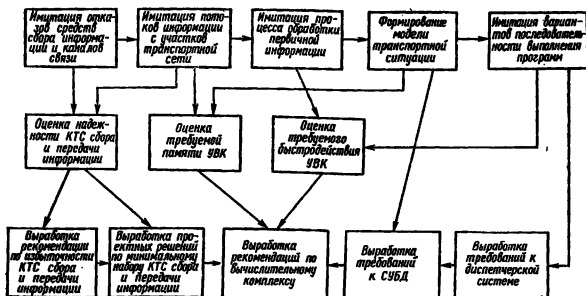


Рис. 5.1. Последовательность проведения имитационных экспериментов при проектировании АСУ промышленного транспорта

Эти факторы оказывают существенное влияние на структуру программного обеспечения.

Действенным инструментом учета всех условий создания системы и преодоления указанных трудностей для проектировщика становится имитация работы транспорта и эксперименты с моделями информационных потоков, вариантами каналов связи, средств сбора и обработки информации и возможными структурами программных комплексов. На рис. 5.1 показана примерная последовательность выполнения имитационных экспериментов в процессе проектирования АСУ промышленного транспорта.

Информационно-управляющие системы работают в режиме советчика с выдачей массы оперативной и справочной информации. Большое значение имеют ее упорядоченность и ориентация на конкретного пользователя. Очевидно, что для уменьшения загрузки последнего выдача информации должна производиться только при отклонениях текущих значений показателей от плановых и нормативных их значений. При этом длительность решения задач и темп выдачи управляющей информации должны согласовываться с реально протекающими процессами принятия решений. В этих условиях требуется, чтобы в системе непрерывно учитывались все имеющиеся изменения объекта и запросы (как внешние, так и внутренние) на решение отдельных задач и определялась оптимальная в данной ситуации последовательность их реализации. Поэтому одной из центральных проблем организации работы таких систем является проблема оперативной диспетчеризации процессов переработки информации. Средством достижения этой цели является наличие дополнительных технических устройств в управляющем комплексе,

в частности устройств сопряжения с датчиками, оперативной и внешней памяти большой емкости и высокого быстродействия, развитой системы прерывания, мультипрограммного режима выполнения программ. Оценку необходимых параметров дополнительных устройств также можно производить с помощью имитации реального процесса принятия решений и вариантов диспетчеризации процесса переработки информации.

При реализации общей алгоритмической структуры информационного обеспечения системы наиболее перспективным подходом является создание модели ведения транспортной ситуации на объекте. Такая модель является информационной основой для решения задач планирования и управления транспортом и сопряженными технологическими процессами. С помощью данной модели осуществляется накопление статистических данных, наличие которых позволяет совершенствовать математическое описание объекта путем его адаптации к реальным изменяющимся условиям. Адекватное математическое описание объекта в свою очередь позволяет проводить имитационные эксперименты для оценки различных воздействий на систему и выбора эффективных управляющих решений.

§ 4. Имитационные процедуры в моделях маршрутизации движения транспортных средств

Как отмечалось ранее, имитационное моделирование в управлении транспортно-технологическими системами наиболее часто применяется в двух направлениях. Во-первых, имитационные эксперименты широко применяются при проектировании автоматизированных систем управления промышленным транспортом, о чем достаточно подробно говорилось в предыдущем параграфе.

Второе направление связано с использованием имитационного моделирования непосредственно в составе функциональных подсистем для алгоритмизации задач планирования и управления транспортом и сопряженными технологическими процессами. Задачи данного класса решаются в основном режиме функционирования информационно-управляющей системы на базе модели ведения транспортной ситуации на объекте. Указанную модель можно представить в виде графа $G = (U, \mathcal{T})$, где U — множество файлов информации, отражающих транспортно-технологическую ситуацию в конечных и промежуточных пунктах транспортной сети; $\mathcal{T}$ — множество дуг (транспортных коммуникаций), связывающих конечные и промежуточные пункты транспортной сети, причем пункты i, j связаны дугой в том случае, если изменение ситуации в пункте i может повлечь за собой изменение ситуации в пункте j и наоборот.

Поскольку транспортно-технологическая система подвержена различным, зачастую случайным возмущениям и многие характеристики транспортных работ носят стохастический характер, то вопросы разработки математических моделей и алгоритмов оперативного планирования и управления транспортом металлургического предприятия далеко не тривиальны. Повышение адекватности функциональных задач реальному процессу требует учета стохастического характера переменных математических моделей, а это делает не всегда возможным использование для решения задач известных методов математического программирования.

Наиболее приемлемым методом решения таких задач становится имитационное моделирование как в чистом виде, так и в сочетании с методами оптимизации и стохастического программирования.

Применение имитационного моделирования здесь мы рассмотрим на примере решения одной из важнейших задач оперативного планирования — задачи маршрутизации движения транспортных средств на различных участках транспортной сети металлургического предприятия.

Задача решается в предположении, что у нас имеется график выпуска переделной металлургической продукции и соответственно нам известны объемы планируемых межцеховых поставок. Последние заданы матрицей $Y = \|y_{ij}\|$, где y_{ij} — плановый объем поставок сырья или переделного металла из i -го в j -й цех. Маршрут движения каждой транспортной единицы не имеет постоянного характера и определяется на основании заявок цехов либо в моменты окончания плавки на сталеплавильных агрегатах, либо в соответствии с графиками выпуска чугуна или загрузки сырья в доменные печи.

Следует подчеркнуть такую важную особенность транспорта металлургического предприятия, как специализация транспортных единиц на перевозке отдельных видов металлургической продукции. На транспортном участке, связывающем сталеплавильные агрегаты и прокатные станы, в основном работают транспортные средства, специализирующиеся на перевозке стальных слитков — слитковозы. Аналогично на участке, связывающем доменные печи и сталеплавильные агрегаты, работают в основном чугуновозы, а на участке шихтовый двор — доменные печи работают транспортные средства, специализирующиеся на перевозке железорудного сырья и кокса. На перечисленных участках транспортной сети металлургического предприятия выполняются и другие виды перевозок, однако их объемы столь незначительны, что задачу оперативной маршрутизации транспортных средств можно разбить на три задачи и решать их относительно независимо друг от друга.

Остановимся более подробно на задаче оперативной маршрутизации движения транспорта на участке «сталь — прокат». Для разработки имитационной математической модели и моделирующего алгоритма введем ряд обозначений. Пусть $A = \{1, 2, \dots, N\}$ — множество номеров транспортных средств (слитковозов), работающих на участке. Каждому номеру $i \in A$ соответствует грузоподъемность слитковоза — q_i , скорость движения груженого — $V_i^{\text{гр}}$ и скорость движения порожнего состава — $V_i^{\text{пор}}$. Заданы также параметры распределений случайных величин $V_i^{\text{гр}}$ и $V_i^{\text{пор}}$.

Множество номеров сталеплавильных агрегатов опишем через $B = \{1, 2, \dots, M\}$. Каждому номеру $j \in B$ соответствуют: вес плавки q_j , который на период оперативного планирования будем считать величиной постоянной; длительность разливки стали в i -й слитковоз — $\tau_{i,j}^{\text{раз}}$, случайная переменная с известными параметрами закона распределения.

По каждому сталеплавильному агрегату к началу решения задачи оперативной маршрутизации имеется график выпуска плавков, т. е. моменты начала разливки стали. Указанные моменты времени по всем агрегатам объединим в множество $R = \{t_{j1}^c, t_{j2}^c, \dots, t_{jn}^c\}$, которое при разработке моделирующего алгоритма будет служить множеством точек «особых состояний».

Наконец, прокатные станы объединим в множество $D = \{1, 2, \dots, k\}$. Каждому номеру $k \in D$ соответствует: $\tau_{ik}^{\text{выг}}$ — длительность выгрузки слитков с i -го слитковоза в нагревательные печи, являющаяся случайной величиной с известными законами распределения; β_k — часовая производительность k -го прокатного стана в пересчете на стальные слитки. В дальнейших расчетах будет использоваться нормативное значение последней.

С учетом топологии транспортной сети и технологических связей между сталеплавильными агрегатами и прокатными станами на участке «сталь — прокат» может быть задана матрица $\|a_{jk}\|$, коэффициенты которой принимают значения:

$$a_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й сталеплавильный агрегат имеет транспортную коммуникацию и прикреплен к } k\text{-му стану;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Основным функциональным соотношением математической модели задачи является формула для расчета момента освобождения слитковоза, т. е. расчета момента окончания разгрузки слитков на входе прокатного стана. Указанный расчет производится при появлении очередного «особого состояния», т. е. в очередной r -й момент времени начала разливки стали на j -м агрегате — t_{jr}^c . Для приема стали здесь выбирается несколько

свободных транспортных единиц, способных вместить всю плавку. Метод выбора последних мы рассмотрим несколько позже.

Момент времени освобождения i -го слитковоза, выбранного для приема стали на j -м агрегате, рассчитывается по формуле

$$t_{ik} = t_{ir}^c + \tau_{ij}^{\text{раз}} + l_{ik}/V_i^{\text{пр}} + \max\{\tau_{ik}^{\text{выг}}, q_i/\beta_k\}. \quad (5.1)$$

Последняя аддитивная составляющая формулы является упрощенным вариантом расчета длительности разгрузки слитков на входе прокатного стана. Для более точного учета данного показателя необходимо моделировать состояние прокатного стана и его нагревательных печей, определяя при этом их занятость и моменты освобождения. Однако при этом значительно усложняется имитационная модель маршрутизации движения транспорта. Согласно формуле (5.1) предполагается, что слитковоз будет разгружаться за время, не меньше, чем большая из двух величин; либо длительность разгрузки слитков в нагревательные печи, либо длительность разгрузки непосредственно для переката при свободном прокатном стане и достаточной температуре слитка.

Момент времени t_i является определяющим для очередной производственной операции i -го слитковоза. В случае, если очередное «особое состояние» окажется больше t_{ik} , то i -й слитковоз может быть выбран для приема стали на соответствующем сталеплавильном агрегате при условии, что между последним и k -м прокатным станом имеется транспортная и технологическая связь.

Приведем пошаговое описание моделирующего алгоритма.

Шаг 1. Ввод исходных данных.

Шаг 2. Формирование множества особых состояний R .

Шаг 3. Выбор j -го сталеплавильного агрегата $j \in B$ с минимальным временем окончания плавки $t_{jr}^c = \min_{s \in R} \{t_{js}^c\}$.

Шаг 4. Вычеркиваем элемент t_{ja}^c из множества особых состояний и проверяем его на окончание процесса моделирования $t_{jr}^c > T$. Если очередное «особое состояние» больше момента окончания планового периода, то переход к шагу 14.

Шаг 5. Формируем подмножество транспортных единиц, готовых к разливке стали на j -м агрегате, т. е. тех, которые могут прибыть к j -му агрегату раньше t_{jr}^c ; $A' = \{i/i \in A; t_{ik} + l_{ik}/V_i^{\text{пр}} \leq t_{jr}^c; \alpha_{jk} = 1\}$.

Шаг 6. Проверка условия $\sum_{i \in A'} q_i \geq P_j$. Если условие удовлетворяется, то переход к шагу 8.

Шаг 7. Формируем подмножество слитковозов, готовых к

разливке стали после загрузки подмножества A' , $A'' = \{i/i \in (A \setminus A'); t_{ik} + l_{ik}/V_i^{\text{nop}} \leq t_{jr}^s + \sum_{i \in A'} \tau_{ij}^{\text{pas}}; \alpha_{jk} = 1\}$.

Шаг 8. Из A' выбираем i -й слитковоз с минимальным временем прибытия на разливку: $l_{ik} + V_i^{\text{nop}}/l_{jk} = \min_{s \in A} \{t_s^T + l_{ik}/V_s^{\text{nop}}\}$.

Полагаем: $A' = A' \setminus \{i\}$; $P_j := P_j - q_i$.

Шаг 9. Если $P_j > 0$, то переход к шагу 10. В противном случае переход к шагу 12.

Шаг 10. Если $A' = \emptyset$, то переход к шагу 8 с заменой подмножества A' на подмножество A'' .

Шаг 11. Выбор k -го прокатного стана для разгрузки i -го слитковоза при условии $\alpha_{jk} = 1$. Пересчет времени освобождения i -го слитковоза согласно формуле (5.1). Переход к шагу 8.

Шаг 12. Печать графиков движения транспортных единиц, погруженных на j -м сталеплавильном агрегате.

Шаг 13. Переход к шагу 3.

Шаг 14. Печать окончательных результатов моделирования.

Шаг 15. Конец.

Блок-схема данного алгоритма показана на рис. 5.2.

При составлении машинной программы информацию по каждой транспортной единице, сталеплавильному агрегату и прокатному стану целесообразно записывать в виде вектора-строки, содержащей стационарные данные об объекте (номер, грузоподъемность, производительность и т. п.), а также текущие данные, описывающие состояние объекта в любой момент времени и содержащие накопительные данные производственных показателей с момента начала моделирования. Объединив векторы-строки технологических агрегатов с векторами-строками транспортных средств, обслуживающих данные агрегаты, мы получим файлы информации, характеризующие транспортную ситуацию на участке «сталь — прокат» (граф $G = (U, \mathcal{T})$).

Отметим, что для расчетов времени освобождения слитковозов по формуле (5.1) и при формировании подмножеств A' и A'' генерируются случайные переменные V_i^{nop} , V_i^{rp} , τ_{jk}^{pas} , $\tau_{ik}^{\text{ныг}}$, параметры законов распределения которых известны и могут находиться в базе данных системы управления транспортом. В процессе функционирования информационно-управляющей системы промышленного транспорта производится накопление фактических данных, их статистическая обработка и постоянное обновление параметров законов распределений.

В результате работы описанного алгоритма будет построен оперативный контактный график перемещения транспортных средств на участке «сталь — прокат». Аналогично может быть

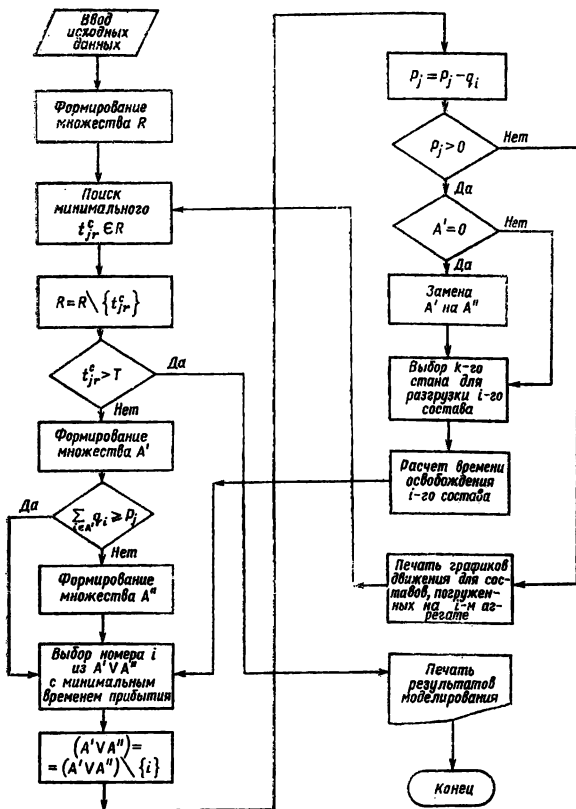


Рис. 5.2. Блок-схема моделирующего алгоритма маршрутизации движения слитковозов

построена имитационная модель маршрутизации движения транспортных средств на участке «чугун — сталь».

Следует отметить, что для более адекватного описания транспортно-технологических процессов на указанных участках необходимо также моделировать движение транспортных средств,

перевозящих не только стальные и чугунные слитки, но и другие виды металлургической продукции и топлива. Особенно важно учесть этот фактор на участке «чугун — сталь», где перевозки различных шихтовых материалов кроме чугуна составляют до 30 % всех транспортных работ.

На участке «шихтовый двор — доменные печи» перевозки железорудного сырья, топлива и прочих шихтовых материалов составляют практически 100 % транспортных работ. Здесь транспорт может рассматриваться как продолжение технологического процесса, так как с его помощью осуществляются смешивание шихтовых материалов, усреднение качественных показателей железорудной шихты, а также управление запасами сырьевых ресурсов. Некоторые вопросы управления, с помощью методов имитационного моделирования производственно-экономическими и транспортными процессами на этом участке мы рассмотрим в следующей главе.

В заключение скажем, что имитационное моделирование должно занимать важное место в АСУ промышленным транспортом, как инструмент исследования различных сторон функционирования транспортно-технологических систем и как метод решения сложных задач планирования и управления работой транспорта во взаимодействии с сопряженными технологическими процессами.

Разработанные модели маршрутизации транспортных средств на участках транспортной сети металлургического предприятия могут быть также использованы при проектировании транспортно-технологических систем. Например, при вводе в строй нового сталеплавильного цеха или прокатного стана возникает задача спроектировать оптимальные транспортные коммуникации, связывающие новые технологические агрегаты со смежными, а также определить необходимое количество дополнительных транспортных единиц, обеспечивающих перевозку новой продукции с минимальными потерями.

Решить такую задачу можно имитационными экспериментами с моделью, аналогичной описанной в данном параграфе. При этом в модель вводятся дополнительные качественные и количественные факторы: варианты транспортных коммуникаций и варианты количества дополнительных транспортных единиц — слитковозов.

Для всех возможных сочетаний вариантов факторов проводятся серии имитационных экспериментов и исследуется поведение реакции. В качестве последней может использоваться какой-либо экономический показатель, например транспортные затраты. На основании предлагаемого исследования можно обоснованно выбрать лучший вариант проекта транспортно-технологической системы.

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ И ИМИТАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СНАБЖЕНИЕМ СЫРЬЕМ

§ 1. Постановка общей задачи управления запасами

Обширную группу производственно-экономических систем, при исследовании которых эффективны численные имитационные эксперименты, образуют так называемые системы управления производственными запасами. В этом параграфе будут рассмотрены вопросы, возникающие при изучении системы оптимального управления созданием запасов. Сделав ряд простых, но совершенно реальных предположений, мы получим достаточно полные решения некоторых важных практических задач.

Наиболее часто при управлении запасами рассматривается постановка задачи создания запасов некоторых предметов для обеспечения не определенного заранее спроса [7].

Возникшую ситуацию можно описать следующим образом: в различные моменты времени мы имеем возможность заказать определенный ассортимент предметов, причем стоимость заказа включает непосредственно стоимость предметов и различные издержки, связанные с их доставкой и хранением на складе. Спрос на предметы, находящиеся на складе, может возникнуть в любой другой момент времени.

Побуждением к созданию запасов служат потери, возникающие всякий раз, когда спрос на предметы превосходит их запас, причем характер этих потерь различен в разных областях производственной деятельности. В производственно-экономических системах эти потери возникают ввиду нехватки перерабатываемого сырья, деталей для сборки машин и агрегатов и т. п. В процессах с непрерывной технологией такие потери весьма чувствительны для производства и экономических показателей, а в некоторых, как, например, в доменном и отдельных процессах химической технологии, вообще недопустимы.

С другой стороны, создание чрезмерного запаса с целью постоянного удовлетворения спроса чревато значительным увеличением издержек на организацию хранения предметов на складе. Издержки от хранения запасов возникают по причине использования дополнительных складских помещений, необходимости обеспечения заданного режима содержания предметов на складе, потребностью в дополнительном складском оборудовании, а также снижением оборачиваемости оборотных фондов.

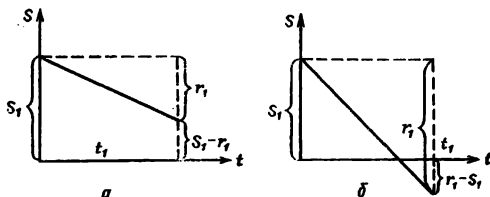


Рис. 6.1. Зависимость спроса продукции от времени

В общих чертах задача управления запасами состоит в том, чтобы на каждом этапе определить стратегию организации запасов, минимизирующую некоторую функцию суммарных потерь, включающих издержки от хранения запасов и неудовлетворенного спроса.

В большинстве задач управления запасами используются различные случайные величины: прежде всего, это спрос со стороны потребителей, а затем сроки поставки предметов поставщиками на склад. Кроме того, в задачах используются переменные, характеризующие издержки хранения, а также издержки от нехватки предметов (неудовлетворенность спроса).

Далее мы рассмотрим модель, в которой будут учтены все перечисленные переменные, пока подробнее остановимся на анализе простейшей системы управления запасами, в которой определяется спрос на r предметов с вероятностью их наличия $P(r)$, а также заданы издержки хранения C_s и штраф за дефицит C_p изделий на складе [40].

Предположим, что за промежуток времени t_1 изменение запаса подчинено линейному закону. Представляются следующие две возможности: либо запаса s_1 к концу периода t_1 было достаточно, чтобы удовлетворить спрос r_1 , и к концу периода мы будем иметь остаток предметов $s_1 - r_1$, либо запас s_1 был недостаточен и мы зарегистрируем нехватку $r_1 - s_1$ предметов. Обе указанные ситуации приведены на рис. 6.1. Отсюда видно, что к концу отрезка времени t_1 у нас образуется остаток предметов (рис. 6.1, а). Затраты, связанные с содержанием указанных предметов на складе, составят $Z'_1 = C_s(s_1 - r_1)$. Во втором случае (рис. 6.1, б) к концу времени t имеет место дефицит изделий и соответственно затраты от неудовлетворенного спроса составят $Z'' = C_p(r_1 - s_1)$. Очевидно, что для случая (а) значение $Z'' = 0$, а для случая (б) аналогично $Z' = 0$.

Переходя к следующему моменту времени t_2 , нужно возобновить запас предметов до уровня s_2 , и с учетом величины спроса r_2 подсчитать значения Z_1 и Z'' . Рассмотрев, таким образом, N отрезков времени t_1 , можно подсчитать издержки выбранной

стратегии управления запасами на весь плановый период времени T ($T = \sum_{i=1}^N t_i$):

$$Z = \sum_{i=1}^N (Z'_i + Z''_i). \quad (6.1)$$

Очевидно, что, меняя стратегию пополнения запасов согласно формуле (6.1), будем получать различные по величине суммарные издержки на плановый период T . Проблема выбора оптимальной стратегии управления запасами весьма сложна. В случае детерминированных значений спроса на предметы и времени удовлетворения заказа на поставку для решения такой задачи обычно применяют классические методы математического, и в частности динамического, программирования [78].

В реальных производственно-экономических системах допущения о детерминированности спроса и времени выполнения заказа на поставку предметов зачастую являются неприемлемыми. Учет всех случайных факторов практически не позволяет решить задачу классическими методами, и наиболее важные характеристики системы управления запасами можно определить только путем моделирования [84].

В следующих параграфах мы рассмотрим имитационные модели управления запасами, позволяющие при выборе эффективных стратегий управления запасами учесть случайный характер переменных и в процессе экспериментов достаточно точно оценивать издержки при различных стратегиях.

§ 2. Имитационные модели управления запасами

Как уже отмечалось, большинство задач управления запасами сводится к поиску оптимального распределения во времени поставок в моделируемую систему. Применительно к производственно-экономической системе, например к промышленному предприятию, ставится задача: сколько и как часто необходимо предприятию производить заказов на сырье, заготовки и т. п., чтобы минимизировать сумму издержек, связанных с хранением запасов, с организацией поставок, а также потерь из-за недостатка продукции на складах.

Рассмотрим систему с запасами однородной продукции, в которой ежедневный спрос и время удовлетворения заказа на поставки продукции являются случайными величинами с заданными функциями распределения. Текущий ежедневный спрос определяет количество продукта, которое каждый день вывозится со склада. Когда уровень запаса падает ниже определенной

отметки, называемой обычно точкой возобновления запаса, предприятие делает заказ на поставку продукции в оптимальном, согласно выбранной стратегии управления, количестве. По истечении времени выполнения заказа, являющегося, как указывалось выше, случайной величиной, продукция поступает на склад и пополняет имеющийся заказ.

Для построения имитационной модели введем следующие обозначения для входных (управляющих) переменных: A_i — спрос на изделия в i -й день, $i = 1, 2, \dots, T$; τ — время на выполнение j -го заказа.

Этим переменным соответствуют функции плотностей вероятностей $F(A)$, $F(\tau)$. В модель также в качестве исходных данных вводятся следующие параметры: C_1 — затраты на хранение единицы продукции в течение суток; C_2 — затраты на организацию одной поставки объемом W ; C_3 — потери, связанные с нехваткой единицы продукции; T — длительность планового периода в сутках; V_1 — начальный уровень запаса на складе; V_2 — точка возобновления запаса.

В процессе имитации функционирования системы управления запасами в модели рассчитывается организованное по «принципу Δt » системное время t , с которым сравнивается время прибытия очередной партии заказанных изделий $\sum_i \tau$ и конечный момент планового периода T . В модели также ведется подсчет трех видов издержек: $\sum_i C_1$ — издержки, связанные с хранением продукции; $\sum_i C_2$ — издержки, связанные с организацией поставок продукции; $\sum_i C_3$ — издержки, определяемые дефицитом изделий на складе.

Выходная (управляемая) переменная модели — суммарные издержки системы управления запасами на плановом отрезке времени T — определяется по формуле

$$Z = \sum_i C_1 + \sum_i C_2 + \sum_i C_3. \quad (6.2)$$

На рис. 6.2 показана блок-схема программы имитационной модели. Программа начинает работать с ввода в ЭВМ значений C_1 , C_2 , C_3 , W , T , V_1 , V_2 , а также параметров, описывающих функции распределений A_i , τ_i . Переменным Z , t , $\sum_i \tau$, $\sum_i C_1$, $\sum_i C_2$, $\sum_i C_3$ присваиваются нули, а текущему значению запаса V присваивается начальный уровень V_1 .

Затем в системе генерируется величина спроса на продукцию в текущие сутки — A_i , и системное время переводится на день.

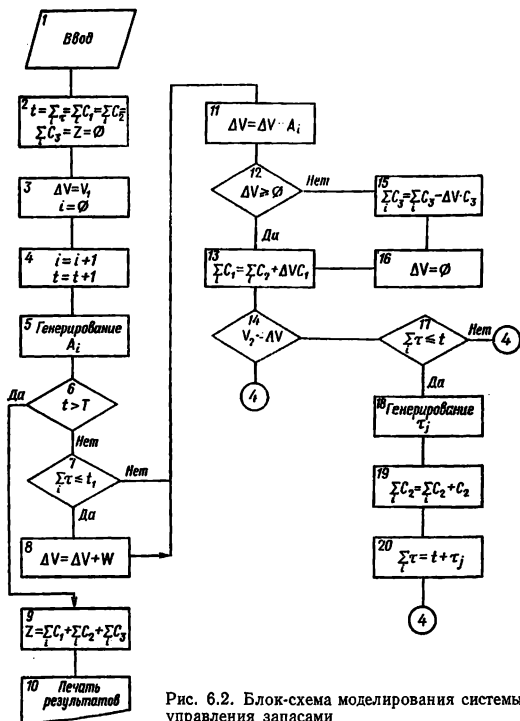


Рис. 6.2. Блок-схема моделирования системы управления запасами

вперед $|t = t + 1|$. В блоке 6 время t сравнивается с моментом окончания планового периода T и в случае, если $t > T$, модель заканчивает работу, печатывает полученное значение Z и другие результаты моделирования. В противном случае осуществляется переход к следующему блоку, где проверяется, будут ли производиться поставки изделий на склад в текущие сутки. Если да, то к текущему запасу прибавляется величина одной поставки, а затем из запаса вычитается сгенерированная ранее величина спроса A_i .

Если текущий запас принял отрицательное значение, т. е. возник дефицит изделий на складе, определяются издержки

$\sum_i C_s$, в противном случае, когда к концу суток остается запас изделий, подсчитываются издержки $\sum_i C_1$, связанные с хранением полученного остатка на складе.

На следующем этапе в модели текущее значение запаса сравнивается с точкой его возобновления и, если оно ниже критической точки, то программа проверяет наличие в системе ранее заказанной, но не реализованной поставки. Если таковой нет, то производится генерирование новой поставки и подсчет издержек от ее реализации $\sum_i C_2$, а затем управление передается

блоку 4, где генерируется новый спрос на продукцию со склада.

С помощью имитационных экспериментов на представленной модели можно изучить влияние объема одной поставки и точки возобновления запаса на суммарные издержки Z , а также определить их оптимальные значения для конкретной системы. Важные для практики результаты можно также получить, исследуя влияние на выходную переменную Z случайных величин спроса на продукцию со склада и интервала между очередными поставками.

Все указанные исследования позволяют выбрать наиболее эффективную стратегию управления запасами продукции (изделий) в реальной производственно-экономической системе. Рассмотренный пример является достаточно простым, однако он легко обобщается на систему управления многономенклатурными запасами, а также позволяет совместить управление запасами с оптимизационными моделями технико-экономического планирования работы поставщиков и потребителей. Пример такого совмещения будет рассмотрен в следующем параграфе.

Следует отметить, что для формулировки математических моделей систем управления запасами при некоторых допущениях целесообразно использовать аппарат автоматного моделирования. Прежде всего это относится к системам с целочисленными объемами поставок и дискретным спросом на изделия, например системам управления складами запчастей автопредприятий. В [4] подробно описаны этот и некоторые другие примеры автоматного моделирования систем управления запасами и материальными потоками.

§ 3. Модель планирования доменного производства и управления запасами железорудного сырья

Известно достаточно много попыток решения задачи планирования производства чугуна на металлургическом предприятии [18, 21]. Для большинства из них характерно то, что практически

не учитывается вероятностный характер параметров производства, и в частности системы управления запасами железорудного сырья.

Рассмотрим следующую практическую задачу управления запасами сырья, возникающую на металлургическом предприятии.

На рудном (шихтовом) дворе крупного металлургического завода имеется несколько пунктов (фронтов) погрузки — выгрузки различных видов железорудного сырья: железной руды, агломерата, окатышей, различных металлосодержащих добавок, которые в различных пропорциях загружаются на переплав в несколько доменных печей. Такие пункты погрузки — выгрузки железорудного сырья всех видов мы в дальнейшем будем называть складами.

Введем следующие обозначения: M — множество складов сырья; N — множество потребителей сырья — доменных печей металлургического завода.

К началу очередных t -х суток решается задача по оптимальному распределению сырья со складов множества M потребителям множества N . Экономико-математическую модель указанной задачи можно записать в следующем виде:

$$I_1: \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} C_i x_{ij} \rightarrow \min; \quad (6.3)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ij} \leq \min \{V_i, P_i\}, \quad i \in M; \quad (6.4)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ij} \geq Q_j, \quad j \in N; \quad (6.5)$$

$$\sum_{i \in M} x_{ij} \alpha_i \geq \beta_j, \quad j \in N; \quad (6.6)$$

$$x_{ij} \geq 0; \quad i \in M; \quad j \in N; \quad (6.7)$$

где x_{ij} — искомый объем поставок сырья с i -го склада в j -ю доменную печь; C_i — стоимость i -го вида сырья; V_i — запас i -го вида сырья; P_i — производительность погрузочно-транспортного оборудования на i -м складе; Q_j — потребность в сырье для j -й доменной печи; β_j — минимально допустимое содержание железа в смеси разных видов сырья на входе j -й доменной печи; α_i — содержание железа в i -м виде сырья.

Решив задачу (6.3) — (6.7), мы составим план загрузки сырья в доменные печи и однозначно определяем объем производства чугуна. Исходя из наличных ресурсов железорудного сырья объем производства для j -й печи определяется равным:

$$A_j = \sum_{i \in M} x_{ij} \beta_j \frac{1 - \Delta_i}{K_i}; \quad j \in N, \quad (6.8)$$

где: Δ_j — потери железа при выплавке чугуна в j -й печи;
 K_j — содержание железа в чугуне, выплавляемом на j -й печи.

В сумме по цеху объем выплавки чугуна в r -е сутки составит

$$A_r = \sum_{j \in N} A_{jr} \quad (6.9)$$

Суточные объемы выплавки чугуна должны удовлетворять директивному заданию на плановый период $\sum_{r=1}^T A_r \geq D$, где T — длительность планового периода.

Для управления запасами сырья на складах можно решить двойственную к (6.3) — (6.7) задачу. В результате решения такой задачи мы получим двойственные переменные, часть из которых, соответствующая ресурсным неравенствам (6.4), является оценками меры дефицитности ресурсов, находящихся на складах сырья. Известно [53], что в том случае если двойственная переменная $y_i = 0$, то соответствующий ей i -й ресурс является недефицитным, а чем больше значение y_i , тем выше его дефицитность и условная цена. Таким образом, при имитационных экспериментах по установлению оптимального уровня запасов на i -м складе двойственная переменная y_i как мера дефицитности ресурсов может служить ценой потерь от отсутствия ресурсов, а также сигналом для возобновления поставок дефицитных ресурсов на склад. Таким сигналом, естественно, служит наличие для ресурсных ограничений модели планирования (6.3) — (6.7) ненулевых двойственных ограничений, т. е. если $y_i > 0$, то запас ресурсов на складе ниже точки его возобновления.

На рис. 6.3 показана структурная блок-схема решения задачи оперативного планирования производства чугуна в синтезе с имитационной моделью управления запасами железорудного сырья на складах. Приведем краткое описание представленной блок-схемы.

В блоке 1 осуществляется ввод исходных данных, необходимых для формирования коэффициентов целевой функции и ограничений задачи (6.3) — (6.7), а также данных, необходимых для проведения имитационных экспериментов с моделью управления запасами сырья на складе. Блок 2 организует цикл расчета плана при заданной стратегии управления запасами.

В блоках 3 и 4 решаются задачи распределения сырья и планирования производства чугуна по модели (6.3) — (6.7) и формулам (6.8) — (6.9).

В блоке 5 решается двойственная задача и из двойственных переменных выбираются оценки меры дефицитности ресурсов,

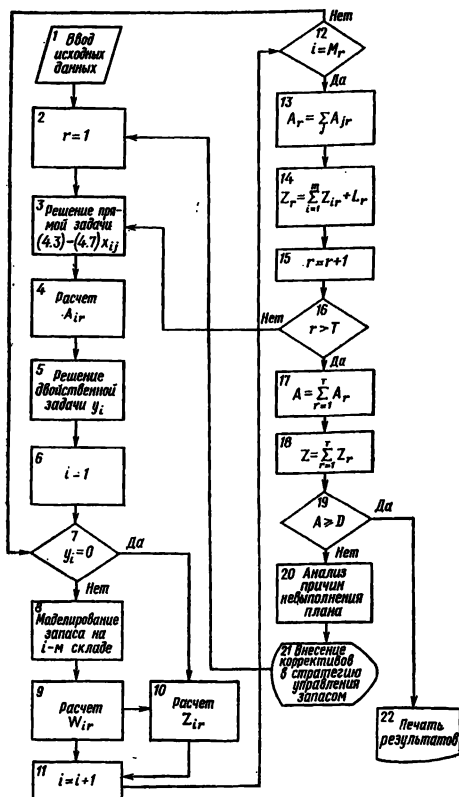


Рис. 6.3. Блок-схема решения задачи планирования производства чугуна и имитации управления запасами железорудного сырья

а в следующих двух блоках с помощью найденных оценок определяются склады, имеющие дефицит ресурсов.

В блоках 8 и 9 определяются объемы заказов на поставку сырья и издержки, связанные с поставками. Для указанных расчетов можно использовать имитационную модель, аналогичную описанной в предыдущем параграфе.

В блоке 10 для складов, имеющих как дефицит, так и избыток ресурсов, рассчитываются суммарные издержки от организации их доставки и хранения. В блоке 11 осуществляется переход к следующему складу, а блок 12 определяет, все ли склады рассмотрены.

Блок 13 выполняет расчет производства чугуна в f -е сутки в целом по цеху, а в блоке 14 подсчитываются суммарные издержки в указанные сутки. При этом учитываются издержки, связанные с поставками и хранением сырья на всех складах, а также затраты на сырье в доменном цехе, рассчитанные согласно целевой функции (6.3).

Блоки 15 и 16 осуществляют переход к следующим суткам и проверку на конец планового периода.

Блоки 17 и 18 рассчитывают объем производства чугуна в плановый период T и суммарные затраты на этот же период в целом по цеху и рудному двору.

Блок 19 проверяет выполнение директивного задания по производству чугуна, а в блоках 20, 21, 22 производится анализ причин невыполнения плана и вносятся соответствующие коррективы в стратегию управления запасами железорудного сырья. Такими коррективами могут быть увеличение объема одной поставки или снижение точки возобновления запаса дефицитного вида сырья.

Следовательно, в представленной модели последовательно решается оптимизационная задача планирования производства чугуна и имитируется система управления запасами на складах рудного двора металлургического завода. Такой подход позволяет, с одной стороны, учесть случайный характер поступления спроса на железорудное сырье, а с другой, получить более достоверный план загрузки доменных печей и производства чугуна.

После получения плана, удовлетворяющего директивному заданию, имитационные эксперименты можно продолжать, строя варианты плана производства чугуна с меньшими суммарными издержками. При этом в выборе лучшего варианта плана может участвовать и человек, для чего в блоках 20, 21, 22 предложенного алгоритма необходимо предусмотреть диалоговый режим. В целом же отметим, что применение построенных моделей и алгоритма существенно повышает эффективность и точность технико-экономического планирования металлургического предприятия.

§ 4. Численные эксперименты с моделью управления запасами и распределением железорудного сырья

Исследуемая в данном параграфе модель управления запасами и распределения сырья для производства чугуна несколько упрощена по сравнению с моделью, описанной в предыдущем параграфе. В частности, при планировании производства чугуна здесь расчеты объемов производства выполнялись в целом по цеху без разбивки по доменным печам. При этом объем производства в каждые сутки генерировался как случайная переменная с известным законом распределения и заданными его параметрами.

Далее в зависимости от полученного путем имитации суточного объема производства чугуна и с учетом запасов технологического сырья производился расчет поставок и использования трех видов железорудного сырья: агломерата, руды и окатышей. Для остальных железосодержащих материалов, используемых в доменном производстве, таких как металлодобавки, окалина, марганцевая руда и др., нормы расхода на производство одной тонны чугуна были приняты постоянными. Приход железа в чугун от указанных материалов находится в пределах 10—11 %.

Исходные данные для первой серии экспериментов, большей частью основанные на реальных показателях работы одного из металлургических заводов, приведены в табл. 6.1.

Целью проводимых имитационных экспериментов явилось установление наиболее эффективной стратегии поставок и запасов железорудного сырья. В первой серии экспериментов, в частности, устанавливалась эффективная стратегия поставок агломерата. Для этого начальный запас руды и окатышей был задан таким, что на период планирования, а им был выбран месяц, дефицита в данных видах сырья не ощущалось. Кроме того, в каждом расчете суточного плана ограничивалось сверху

Таблица 6.1

Входная переменная	Параметр закона распределения		Содержание железа, %	Начальный запас, тыс. т
	М, тыс. т	σ, тыс. т		
Объем производства чугуна	9,27	0,021	94	0
Поставка агломерата	9,0	0,033	55	15
Поставка руды	1,1	0,028	50	10
Поставка окатышей	5,3	0,013	60	40

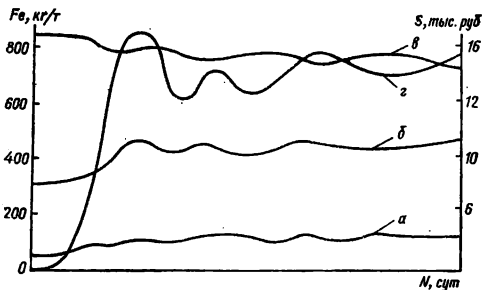


Рис. 6.4. Приход железа из сырья и колебания прироста затрат в зависимости от использования окатышей

потребление железной руды, так как это имеет место зачастую в реальной практике планирования.

В качестве критерия оптимальности задачи суточного планирования выбран минимум затрат на железорудное сырье. Отметим здесь, что поскольку руда в каждом расчете на производство чугуна потреблялась на достаточно постоянном уровне верхнего ограничения, а также ввиду ее относительной дешевизны, расчет затрат на руду в целевой функции не производился.

Часть результатов первой серии имитации для 15 суток планируемого месяца показана в табл. 6.2. Отсюда видно, что при данной стратегии организации запаса и поставок агломерата он весь используется практически «с колес», т. е. поставки агломерата в текущие сутки полностью планируются к использованию на производство чугуна в следующие сутки. Нехватка агломерата при ограничении на потребление руды приводит к избыточному использованию более дорогого сырья — окатышей, запас которых в данном примере практически не ограничен.

На рис. 6.4 показаны колебания прихода железа (а) — из руды; (б) — из окатышей и (в) — суммарные из руды и агломерата. Здесь показаны колебания прироста затрат за счет избыточного использования в производстве чугуна окатышей. Нуль прироста здесь наблюдается в первые двое суток, когда существовал достаточный запас агломерата на складе и его потребление планировалось согласно технологическим ограничениям в балансовой модели распределения сырья. В последующие сутки наблюдался дефицит агломерата, что также подтверждались ненулевыми двойственными оценками соответствующих ограничений. При этом наблюдается рост прихода железа из

Таблица 6.2

Номер суток	Чугун, суточное производство, тыс. т	Агломерат, тыс. т		
		потребление	суточная поставка	запас к началу следующих су- ток
1	9,36	11,0	8,0	12,0
2	9,34	11,0	9,5	10,5
3	9,30	10,5	9,2	9,2
4	9,25	9,2	8,5	8,5
5	9,34	8,5	9,4	9,4
6	9,30	9,4	9,2	9,2
7	9,32	9,2	8,9	8,9
8	9,37	8,9	9,6	9,6
9	9,35	9,6	9,1	9,1
10	9,25	9,1	8,7	8,7
11	9,20	8,7	9,2	9,2
12	9,22	9,2	9,3	9,3
13	9,20	9,3	8,9	8,9
14	9,21	8,9	9,1	9,1
15	9,35	9,1	8,7	8,7

окатышей, которыми покрывался соответствующий дефицит агломерата.

Расчет прироста затрат производился исходя из разности в ценах на окатыши и агломерат, равной 10 руб./т, что близко к реальным данным. Указанный показатель в исследуемой имитационной модели является фактически управляемой (выходной) переменной. К сожалению, отсутствие достоверных исходных данных не позволило учесть в процессе эксперимента затраты на организацию хранения запасов руды и окатышей, хотя предполагается, что они вряд ли существенно сказываются на изменениях затрат при перераспределении потребления того или иного вида сырья в доменном производстве.

На следующих этапах эксперимента последовательно вносились коррективы в стратегию управления поставками агломерата без изменения начальных условий и параметров модели. На рис. 6.5 показаны изменения прироста затрат от избыточного использования окатышей S в зависимости от уровня суточной поставки агломерата A . Как видно из рис. 6.5, избыточное использование окатышей практически исчезает при достижении уровня поставок агломерата в размере 11 тыс. т в сутки. Затраты S в каждой серии экспериментов подсчитывались как среднесуточные по всему имитируемому плановому периоду.

Отметим, что аналогично можно проводить исследования на установление оптимального уровня суточных поставок других видов железосодержащего сырья и материалов на производство чугуна. Кроме того, с помощью данной модели можно проводить

Руда, тыс. т			Приход железа в чугун, кг/т		
потребление	суточная поставка	запас к началу следующих суток	из агломерата	из руды	из окатышей
0,85	1,0	10,12	646,6	45,4	208,0
0,9	0,9	10,15	647,7	48,2	204,1
0,95	0,9	10,1	620,9	51,1	228,0
1,2	1,0	9,9	562,2	64,8	310,0
1,3	1,2	9,8	501,0	69,6	334,0
1,1	1,2	9,8	556,0	59,1	293,0
1,2	1,2	9,9	543,6	64,2	908,8
1,3	0,9	9,5	522,0	69,4	285,4
1,0	1,1	9,6	565,0	50,3	294,6
1,2	1,2	9,6	541,0	64,8	315,0
1,2	1,1	9,5	520,0	64,9	313,7
1,0	1,1	9,6	537,0	50,4	310,0
1,2	1,0	9,4	526,6	64,9	304,5
1,1	0,9	9,2	537,2	59,3	315,0
1,0	1,2	9,5	535,0	69,5	320,1

эксперименты по установлению эффективного начального уровня запасов сырья.

Следует подчеркнуть, что описанные эксперименты были существенно упрощены по отношению к реальным условиям функционирования доменного производства. Сделано это было как для наглядности проиллюстрированных выше результатов, так и ввиду отсутствия некоторых фактических данных. По этим же причинам нельзя с полной категоричностью утверждать о пригодности данной модели, хотя и предпосылок отвергать модель не имеется.

С точки зрения теории планирования эксперимента мы исследовали поведение одной выходной переменной в зависимости от уровней одного фактора. Кроме того, на каждой стадии эксперимента решалась задача линейного программирования, в которой управляющий фактор A — уровень суточной поставки агломерата — был связан линейными соотношениями с независимыми переменными: объемом потребления руды и окатышей, а также суточным объемом производства чугуна. Полученные здесь гипотетические зависимости в общем тоже не далеки от истины, хотя бы потому, что ситуации, аналогичные получившимся в первой серии экспериментов,

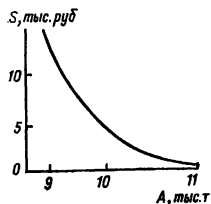


Рис. 6.5. Зависимость прироста затрат на сырье от уровня поставок агломерата

когда при дефиците одного вида сырья в производстве используются более дорогостоящие виды, часто имеют место в реальных условиях.

Данный пример полезен также с методической точки зрения, так как позволяет перейти к более сложным экспериментам с целями, изложенными в предыдущем параграфе. В заключение отметим, что на основании рассмотренной модели и по результатам экспериментов была разработана имитационная деловая игра, используемая в обучении и повышении квалификации управленческого персонала предприятий отрасли, которая может быть полезна для обучения студентов соответствующих специальностей.

§ 5. Модель управления многофазной системой снабжения сырьем

С системами планирования производства и управления запасами, рассмотренными в предыдущих параграфах, тесно переплетается работа транспорта. Известно, что в системах управления промышленным транспортом существенную роль играет задача распределения технологического сырья между рабочими агрегатами [26]. Эту задачу обычно решают методами линейного программирования, не позволяющими учитывать динамику процесса перевозок и рассматривать случайные параметры транспортного процесса, что снижает ценность принимаемых решений.

Здесь транспортную систему мы рассмотрим как многофазную систему снабжения, в состав которой входят склады и связывающие их пути. Процесс перевозок можно рассматривать как задачу оптимального управления в конечно-разностном виде, где запасы материалов в отдельных пунктах являются фазовыми (независимыми) переменными, а перевозки грузов — управляющими. Приведенный подход позволяет планировать динамику перемещений технологического сырья на предприятии, учитывая при этом спрос на материалы, поставки грузов, пропускные способности путей и запасы сырья на складах.

Для того чтобы достаточно гибко представить общую схему снабжения цехов и агрегатов предприятия технологическим сырьем, целесообразно различать следующие склады:

исходные, куда прибывают грузы со стороны;

промежуточные (условные), наличные запасы которых определяются количеством вагонов с сырьем на подъездных и внутренних транспортных коммуникациях предприятия;

резервные, представляющие собой специально предусмотренные емкости для предварительной обработки технологического сырья, например усреднения перед обогащением;

конечные, т. е. приемные емкости технологических агрегатов, непосредственно связанных с основным производством предприятия.

Как отмечалось ранее, некоторые переменные реальных аппаратов систем носят случайный характер, например поставки грузов на предприятие со стороны $d(t, \theta)$ или спрос на сырье внутри предприятия $q(t)$. Если условиться, что $Z_i(t)$ — запасы технологического сырья на i -м складе, а $x_{lm}(t)$ — перевозки грузов со склада l на склад m в момент времени t , то многофазную систему снабжения можно описать с помощью следующей математической модели:

$$\left. \begin{aligned} Z_1(t+1) &= Z_1(t) - x_{1l}(t) + d(t, \theta); \quad t = \overline{0, T-1}; \\ Z_i(t+1) &= Z_i(t) + x_{li}(t) - x_{im}(t), \quad i = \overline{2, n-1}; \\ t &= \overline{0, T-1}; \\ Z_n(t+1) &= Z_n(t) + x_{ln}(t) - q(t), \quad t = \overline{0, T-1}; \\ x_{lm}(t) &\in X; \quad Z_i(t) \in Z. \end{aligned} \right\} \quad (6.10)$$

Следует учесть, что для случайных переменных $d(t)$ и $q(t)$ параметры законов распределения заранее известны.

В качестве критерия оптимальности задачи можно принять экономический критерий минимизации суммарных затрат в системе снабжения:

$$f(x, z, d, q) = M \sum_t \left(\sum_{l,m} a_{lm} x_{lm}(t) + \sum_k r_k Z_k(t) + h \delta(t) \right) \rightarrow \min, \quad (6.11)$$

где a_{lm} — затраты на перевозку единицы груза со склада l на склад m ; r_k — затраты на хранение сырья на k -м складе в течение одного промежутка времени t ; h — издержки в случае недопоставки сырья со стороны на исходные склады, которые вычисляются по формуле

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & q(t) \leq Z_n(t) + x_{kn}(t), \\ 1, & q(t) > Z_n(t) + x_{kn}(t). \end{cases}$$

Задача в постановке (6.10) — (6.11) является задачей стохастического программирования и имеет ряд особенностей, существенно затрудняющих ее решение известными методами. Достаточно легко преодолеваются трудности, возникающие из-за наличия ограничений на фазовые переменные. В этом случае задача представляется как задача о потоке в сети [75, 94], примерный вид которой показан на рис. 6.6.

Источниками сети являются запасы на складах в нулевой момент времени и поступления грузов на предприятие в течение всего промежутка планирования. Стоки — запасы на складах

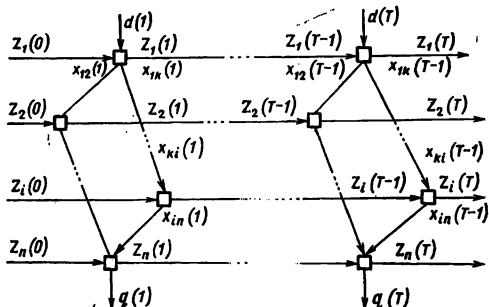


Рис. 6.6. Транспортная сеть многофазной системы снабжения сырьем

в конечный плановый период и спрос на продукты в каждый промежуток планирования. Алгоритм решения задачи о потоке в сети требует, чтобы выполнялось условие баланса источников и стоков.

После того как задача записана таким образом, для ее решения можно применять метод стохастических квазиградиентов, изложенный в [43]. При этом решение задачи можно представить как итерационный процесс, в результате которого получаем последовательность управлений $\{x^s(t), s = 0, 1, \dots; t = \overline{0, T-1}\}$, сходящуюся к оптимальному решению описанной выше задачи.

Пусть x^0 — произвольный вектор начальных управлений, x^s — приближение вектора управлений после s -й итерации. На следующей $s+1$ итерации с помощью датчиков случайных чисел моделируем величины поставок и спрос на материалы. Таким образом, в процессе построения оптимального решения задачи используются элементы имитационного моделирования.

Далее решается задача о максимальном потоке минимальной стоимости. Пусть U^s — вектор дуговых чисел, соответствующих $x_{in}^s(t)$, тогда новое приближение x^{s+1} определяется по формуле $x^{s+1} = \pi_x(x^s - \rho_s(f_x(x^s) + U^s))$, $s = 0, 1, \dots$, где $\pi_x(\cdot)$ — операции проектирования на допустимую область X ; ρ_s — величина шага спуска, причем $\rho_s \rightarrow 0$, $\rho_s \geq 0$, $\sum_{s=0}^{\infty} \rho_s = \infty$,

$\sum_{s=0}^{\infty} \rho_s^2 < \infty$, $f_x(x^s)$ — градиент целевой функции по x в точке x^s .

Ограничения на пропускные способности путей имеют вид двойных простейших неравенств, поэтому X является прямо-

угольной областью. Операция проектирования на прямоугольную область не представляет затруднений.

Следует отметить, что для реальных условий размерность задачи может оказаться весьма значительной. Например, на крупном металлургическом предприятии для участка «станция примыкания — шихтовый двор — доменные печи и сталеплавильные агрегаты» сеть может иметь более 60 вершин и до 150 дуг. В данных условиях применение разработанного метода оперативного планирования может оказаться весьма затруднительным. Здесь целесообразно выбирать значения управляющих переменных $x(t)$ с помощью имитационных экспериментов. При этом количество экспериментов ограничивается временем, отведенным для соответствующих расчетов в условиях функционирующей АСУ. Допустимое время в свою очередь определяется быстродействием и памятью используемой управляющей ЭВМ. Имитационное моделирование позволяет также повысить адекватность модели (6.10) — (6.11) введением в нее дополнительных случайных переменных по аналогии с рассмотренными ранее моделями управления промышленным транспортом и запасами.

В заключение отметим, что изложенный здесь метод решения задачи о максимальном потоке минимальной стоимости программно реализован на ЭВМ ЕС-1040. Эксперименты показали его достаточную эффективность для небольших сетей. Например, для сети с 20 вершинами и 31 дугой время счета составило 5 с, что удовлетворяет требованиям оперативного управления предприятиями с аналогичной по величине транспортной сетью. В частности, предложенный метод использован при проектировании АСУ на некоторых горнообогатительных комбинатах.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОТРАСЛЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

§ 1. Постановка задачи отраслевого планирования производства продукции

Метод имитационного моделирования может служить эффективным инструментом конструирования планов производства на всех уровнях управления пародным хозяйством на предприятиях, в объединениях и т. д.

В настоящее время достаточно широко имитационные процедуры используются при составлении плановых заданий на отраслевом и территориальном уровнях, а также при моделировании текущего выполнения плана предприятиями и объединениями отраслей пародного хозяйства. Из публикаций, посвященных данному вопросу, можно отметить работы С. Б. Перминова, В. Л. Макарова и других авторов [42, 50, 69, 70, 71, 80].

В данной главе мы рассмотрим методы построения планов отраслевого производства однородной массовой продукции с помощью имитационных моделей. Примером отраслей, производящих однородную продукцию, может служить черная и цветная металлургия, химическая промышленность и др.

Поставленная задача формулируется следующим образом: пусть в отрасли имеются несколько предприятий, выпускающих однородную продукцию. Требуется составить план производства продукции на предприятии таким образом, чтобы отраслевой объем ее выпуска удовлетворял директивному заданию. С одной стороны, на предприятиях должны быть максимально использованы внутренние резервы, с другой — задание на производство продукции должно быть реальным, т. е. максимально выполнимым. Такие планы составляются на уровне отрасли при наличии достоверной информации о фактическом состоянии цехов и агрегатов, планируемых капитальных ремонтах, возможном совершенствовании организации и технологии функционирования предприятий, вводе — выводе новых мощностей. Вся перечисленная информация может быть представлена в виде факторов, оказывающих влияние на объем производства продукции на предприятиях. При составлении отраслевого плана важно знать влияние случайных факторов на показатели плана и, естественно, что достоверность и реальность планов будут тем выше, чем точнее будет учтено влияние случайных факторов.

Решение поставленной задачи предполагается проводить в два этапа. На первом этапе используется классическая схема имитационного моделирования, с помощью которой моделируется локальное поведение случайных факторов, и в зависимости от выбранных для них уровней строятся варианты планов производства продукции.

На втором этапе для сокращения допустимых вариантов планов использованы модификации целочисленных методов последовательного анализа и отсеивания вариантов [66].

Для описания математической модели задачи введем следующие обозначения: N — множество предприятий (агрегатов, цехов) производящих однородную продукцию в отрасли, $N = 1, 2, \dots, n$; M — множество случайных факторов, влияющих на объем производства продукции, являющихся управляющими переменными, $M = 1, 2, \dots, m$.

В базах данных отраслевых автоматизированных систем управления в настоящее время содержится значительный объем отчетной информации о состоянии цехов и агрегатов за прошедшие промежутки времени. На основании этой информации легко построить законы распределения случайных факторов и определить основные параметры распределений: математические ожидания $\bar{a}_{ij}$, $i \in N$, $j \in M$ и среднеквадратические отклонения σ_{ij} , $i \in N$, $j \in M$, а также гипотетически определить законы распределения случайных величин.

В процессе планирования работы отрасли по данной методике предполагается участие специалистов отраслевых органов управления — экспертов и ЛПР, с помощью которых составляется матрица возможных изменений факторов, направленных на улучшение технико-экономических показателей работы предприятий на планируемый период: $S = \|S_{ij}\|$,

где $S_{ij} = 0$, если изменения j -го фактора на i -м предприятии не предполагается;

$S_{ij} = \Delta < 1$ максимально допустимое относительное изменение фактора; 1, если изменение фактора допускается, но эксперт не указывает предельных изменений.

Объем производства продукции на i -м предприятии определяется как некоторая функция (поверхность отклика) от случайных факторов $F_i = f(a_{ij})$; $i \in N$; $j \in M$.

Расчет вариантов производства продукции на i -м предприятии в общем виде можно записать следующим образом: пусть z_{ij} — выбранный шаг изменения уровня i -го фактора на j -м предприятии и возможные уровни факторов определяются так: $a_{ij}^{(1)} = \bar{a}_{ij}$; $a_{ij}^{(2)} = \bar{a}_{ij} (1 \pm z_{ij})$; $a_{ij}^{(3)} = \bar{a}_{ij} (1 \pm 2z_{ij})$... Знак «минус» при расчете уровней принимается в том случае, если совершенствование фактора связано с уменьшением его абсолютной

величины. Для сокращения вариантов планов производства шаг изменения уровня фактора целесообразно выбирать таким, чтобы количество уровней было незначительным.

В [63] для решения подобного класса задач рекомендуется ограничиться одним-двумя уровнями факторов. В поставленной задаче при заданном предельном значении изменения фактора Δ ($S_{ij} = \Delta$) шаг можно выбирать равным $z_{ij} = \frac{1}{2} \Delta$. В случае, если $S_{ij} = 1$, предельное значение уровня фактора можно принять равным $a_{ij} = \pm 3\sigma_{ij}$ и величину шага определить равной $z_{ij} = \frac{3}{2} \sigma_{ij}$.

Каждому сочетанию различных уровней факторов соответствует вариант плана производства продукции. Обозначим W_i — множество вариантов планов производства продукции на i -м предприятии. Если мы построим все возможные варианты, то их количество определяется следующим образом: $f_i = |W_i| = \prod_{j=1}^m k_{ij}$, где k_{ij} — максимальное количество уровней j -го фактора.

Для получения на ЭВМ очередного варианта необходимо выполнить серию параллельных расчетов, в процессе которых имитируется случайный характер факторов. Необходимое количество параллельных экспериментов определяется с помощью методов теории планирования экспериментов. Математическим ожиданием в процессе имитации случайного характера фактора по известному закону распределения служит его уровень, выбранный для построения очередного варианта плана.

§ 2. Имитационная модель и алгоритм выбора оптимального плана производства металлургической продукции

Предложенную схему применения имитационного моделирования для планирования производства однородной продукции можно достаточно просто реализовать в отраслевом планировании черной металлургии. Рассмотрим практический пример реализации метода при планировании производства стали на предприятиях отрасли. При этом реализуем сначала предложенную схему для построения нескольких вариантов плана производства стали на одном предприятии, а затем рассмотрим вопросы построения оптимального варианта на отраслевом уровне.

Важнейшими факторами, влияющими на объем производства стали, которые необходимо учитывать при планировании на уровне отрасли, являются текущие простои агрегатов, вес "

Таблица 7.1

Фактор	$\bar{a}_i$	σ_i	Уровни фактора	
			a_i^1	a_i^2
t_i	2,55	0,089	2,55	2,42
τ_i	8,3	0,2	8,3	8,0
Q_i	4,48	0,035	4,48	4,53

Примечание. Законы распределения величин t_i , τ_i и Q_i нормальные.

длительность плавки. Объем производства стали на i -м предприятии как функция этих факторов определяется по формуле

$$P_i = (T - t_i) \frac{24}{\tau_i} Q_i, \quad (7.1)$$

где T — календарное время на планируемый период, сут; t_i — текущие простои, сут; τ_i — длительность плавки, ч; Q_i — вес плавки, тыс. т.

Приведенное уравнение будет служить основным функциональным соотношением, связывающим входные и выходные переменные имитационной модели. Исходные данные для решения задачи, выбранные на основе экономико-статистического анализа перечисленных в модели (7.1) факторов для реальных производственных условий, показаны в табл. 7.1. В данном примере такие условия характерны для одного из металлургических заводов.

По предложенной методике с использованием начальных условий у уровней факторов, заданных в табл. 7.1, построены месячные варианты планов производства стали на предприятии. В процессе построения имитировался случайный характер перечисленных факторов. Для расчета каждого варианта параллельно проводилось восемь параллельных опытов, необходимое количество которых определялось с помощью формул, приведенных в [61]. Результаты выполненных имитационных расчетов восьми вариантов плана приведены в табл. 7.2.

При сравнительной оценке полученных результатов с помощью t -критерия Стьюдента установлено, что разности между математическими ожиданиями планов производства в различных вариантах являются значимыми. Это позволяет сделать вывод о том, что в пределах выбранных изменений уровней факторов на данном предприятии можно добиться увеличения объема производства стали (рис. 7.1). На рис. 7.1 показаны результаты серий имитационных экспериментов, выполненных для трех сочетаний уровней факторов. Здесь приведены колебания

Таблица 7.2

Номер варианта	Сочетание уровня фактора			Объем производства в параллельных					
	t_i	τ_i	Q_i	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	P_{i6}
1	$t_i^{(1)}$	$\tau_i^{(1)}$	$Q_i^{(1)}$	361	360	355	359	358	363
2	$t_i^{(1)}$	$\tau_i^{(1)}$	$Q_i^{(2)}$	374	362	369	375	370	371
3	$t_i^{(1)}$	$\tau_i^{(2)}$	$Q_i^{(1)}$	391	375	378	378	381	380
4	$t_i^{(2)}$	$\tau_i^{(1)}$	$Q_i^{(1)}$	380	384	385	389	385	388
5	$t_i^{(1)}$	$\tau_i^{(2)}$	$Q_i^{(2)}$	366	360	363	358	369	360
6	$t_i^{(2)}$	$\tau_i^{(1)}$	$Q_i^{(2)}$	372	374	374	371	377	375
7	$t_i^{(2)}$	$\tau_i^{(2)}$	$Q_i^{(1)}$	390	381	378	380	376	382
8	$t_i^{(2)}$	$\tau_i^{(2)}$	$Q_i^{(2)}$	387	387	392	384	391	386

средних значений трех вариантов плановых заданий по объему производства стали, построенные при сочетании факторов: (а) — $t_i^{(1)} = 2,55$; $\tau_i^{(1)} = 8,3$; $Q_i^{(1)} = 4,48$; (б) — $t_i^{(2)} = 2,42$; $\tau_i^{(1)} = 8,3$; $Q_i^{(1)} = 4,48$; (в) — $t_i^{(2)} = 2,42$; $\tau_i^{(2)} = 8,0$; $Q_i^{(2)} = 4,53$. Для каждого из трех сочетаний было выполнено по 12 серий экспериментов, а в каждой серии, как отмечалось выше, проводилось восемь параллельных расчетов. Отметим, что в табл. 7.2 показаны данные первой из 12 серий экспериментов. Кривая «з» показывает фактические колебания объемов производства стали по месяцам в базовом году, по отчетным данным которого производился экономико-статистический анализ.

Дисперсионный анализ с помощью F -критерия показал, что выборочные средние по всем совокупностям экспериментов не

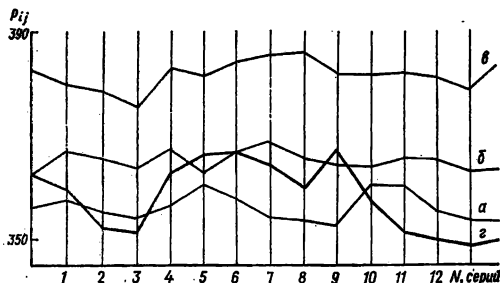


Рис. 7.1. Колебания средних значений объемов производства в различных сериях имитационных экспериментов

Вариантах, тыс. т		Объем про- изводства
P_{i7}	P_{i8}	P_i
356	370	359
373	375	371
379	379	379
390	379	385
360	360	362
371	380	374
379	382	381
389	390	387

совпадают, а это также подтверждает правильность выбранного направления изменения уровней факторов для увеличения объемов производства.

Следующим этапом предлагаемой методики является построение нескольких наиболее эффективных вариантов плана производства продукции в общепромышленном масштабе. Общее количество таких вариантов определяется

как $F = \prod_{i=1}^n f_i$ и может оказаться весьма значительным. Например, для 10 предприятий отрасли при $f_i = 8$ и $i = 1, 10$ количество возможных вариантов отраслевых планов равно $F = 8^{10}$.

В общем виде математическая модель задачи выбора оптимального варианта отраслевого плана может быть записана следующим образом:

$$\sum_{j \in N} \sum_{i \in M_j} x_{ij} C_{ij} \rightarrow \max; \quad (7.2)$$

$$\sum_{i \in M_j} x_{ij} = 1, \quad j \in N; \quad (7.3)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{i \in M_j} a_{ijk} x_{ij} \leq B_k, \quad k \in K; \quad (7.4)$$

$$x_{ij} = 0 \vee 1, \quad j \in N, \quad i \in M_j. \quad (7.5)$$

Здесь $N = \{1, 2, \dots, n\}$ — множество предприятий отрасли; $M_j = \{1, 2, \dots, m_j\}$ — множество вариантов плана, сформированных в результате имитационных экспериментов для j -го предприятия; x_{ij} — булева переменная, принимающая значение единицы, если для j -го предприятия выбран i -й план, и нуля в противном случае; C_{ij} — экономический показатель i -го варианта плана на j -м предприятии, который необходимо максимизировать в отраслевом плане (например, валовой объем продукции, прибыль и т. п.); a_{ijk} — затраты k -го ресурса в i -м варианте плана на j -м предприятии; B_k — отраслевой лимит k -го ресурса, $K = \{1, 2, \dots, l\}$ — множество лимитируемых ресурсов.

Задача в постановке (7.2) — (7.5) имеет несколько специфических особенностей, позволяющих разработать модификацию какого-либо известного алгоритма направленного перебора, значительно ускоряющую его сходимость. В частности, заранее

известное количество переменных, принимающих значение единицы в оптимальном решении, позволяет использовать идеи модификации алгоритма Балаша [6], предложенные в [66].

Вторая особенность заключается в том, что множество всех переменных разбито на ряд подмножеств, по каждому из которых необходимо выбрать одну переменную и присвоить ей значение единицы, остальные же переменные будут равны нулю.

С учетом этих особенностей разработан алгоритм, основанный на методе последовательного анализа и отсеивания вариантов [55] с использованием модификации алгоритма Балаша.

Набор $x_{ij} = 1$ будем называть решением, если он удовлетворяет ограничениям $\sum_{i \in M_j} x_{ij} = 1$; $j \in N_r$, $N_r \subset N$ и (7.4) —

(7.5); допустимым решением, если он удовлетворяет ограничениям (7.3) — (7.5), и оптимальным решением, если он удовлетворяет ограничениям (7.3) — (7.5) и достигается максимум (7.2).

По аналогии с алгоритмом Балаша предлагаемый алгоритм строит последовательность решений изменением набора переменных $x_{ij} = 1$, которая сходится к оптимальному. Для описания алгоритма введем некоторые обозначения и определения.

Обозначим через $A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{ij1} \\ a_{ij2} \\ \vdots \\ a_{ijl} \end{pmatrix}$ — вектор-столбец матрицы

коэффициентов ограничений. Через $U^{(r)} = \begin{pmatrix} u_1^{(r)} \\ u_2^{(r)} \\ \vdots \\ u_l^{(r)} \end{pmatrix}$ — вектор-

столбец текущих значений лимита ресурсов на r -й итерации при $r = 0$; $U_k^{(r)} = b_k$; $k \in K$.

Выберем в каждом подмножестве M_j максимальные значения коэффициентов целевой функции $\hat{C}_j = \max_{i \in M_j} \{C_{ij}\}$; $j \in N$,

а также для каждой строки ограничений минимальные значения коэффициентов матрицы ограничений $a_{jk} = \min_{i \in M_j} \{a_{ijk}\}$; $j \in N$; $k \in K$.

До r -й итерации у нас сформированы следующие множества: $N_r = \{1, 2, \dots, f\}$ — множество номеров подмножеств вариантов $j \in N$, для которых выбрано по одному x_{ij} , $i \in M_j$, равному единице; $L_r = \{i_1, i_2, \dots, i_f\}$ — множество номеров вариантов, соответствующих переменным которых присвоено значение единицы ($x_{ij} = 1$); $S_1, S_2, \dots, S_f$ — множество номеров вариантов, просмотренных к r -й итерации в множествах $M_1, M_2, \dots$

..., $M_f (S_1 \subseteq M_1, S_2 \subseteq M_2, \dots, S_f \subseteq M_f)$. Обозначим Z_r — текущее значение целевой функции для решения, построенного к r -й итерации; Z^* — максимальное значение целевой функции для допустимых решений, построенных к r -й итерации. Если допустимых решений нет, то $Z^* = 0$. Опишем работу алгоритма на промежуточной r -й итерации. На данной итерации мы должны выбрать из множества M_{f+1} один из векторов с номером i_{f+1} и соответствующей переменной $x_{i_{f+1}f+1}$ присвоить значение единица. Прежде всего формируем множество $N_r = N_{r-1} \cup \{f+1\}$. Далее формируем подмножество вариантов D_r , присоединение любого из которых к текущему решению заведомо не увеличит имеющееся Z^* , т. е.

$$D_r = \left\{ i/i \in M_{f+1}; Z_r + C_{i_{f+1}} + \sum_{j \in (N \setminus N_r)} \hat{C}_j < Z^* \right\}. \quad (7.6)$$

Затем сформируем подмножество G_r вариантов, присоединение которых к решению заведомо приведет к невыполнению хотя бы одного ограничения по ресурсам:

$$G_r = \left\{ i/i \in (M_{f+1} \setminus D_r); \sum_{j \in (N \setminus N_r)} \hat{a}_{jk} + a_{i_{f+1}k} > U_r^k \right\}. \quad (7.7)$$

На следующем шаге формируем множество F_r допустимых к выбору вариантов:

$$F_r = M_{f+1} \setminus (D_r \cup G_r \cup S_{f+1}), \quad (7.8)$$

из которого и выбирается i -й вариант. При этом соответствующей переменной присваивается значение $x_{i_{f+1}f+1} = 1$ и осуществляется переход к $r+1$ итерации.

Правилом для выбора варианта может служить попытка быстройшего достижения максимального значения критерия, т. е. выбирается вектор i_{f+1} , для которого: $C_{i_{f+1}f+1} = \max \{C_{i_{f+1}}\}$. При переходе к $r+1$ итерации предварительно полагаем

$$N_{r+1} = N_r \cup \{f+1\}; \quad L_{r+1} = L_r \cup \{i_{f+1}\}; \\ U^{(r+1)} = U^{(r)} - A_{i_{f+1}f+1}, \quad Z_{r+1} = Z_r + C_{i_{f+1}f+1}, \quad S_{f+1} = S_{f+1} \cup \{i_{f+1}\}.$$

В случае, если на r -й итерации мы получили $F_r = \emptyset$, то на $r+1$ -й итерации осуществляются возврат к предыдущему множеству M_f и построение очередного решения с другим вариантом i_f . В этом случае из L_r выбираем последний номер i_f и полагаем

$$N_{r+1} = N_r \setminus \{f\}; \quad S_{f+1} = \emptyset; \\ L_{r+1} = L_r \setminus \{i_f\}; \quad U^{(r+1)} = U^{(r)} + A_{i_ff}; \quad Z_{r+1} = Z_r - C_{i_ff}.$$

Затем строим аналогично (7.6) и (7.8) множества D , G и F и выбираем новый вариант i_f . Алгоритм заканчивает работу в том случае, когда $F_f = \emptyset$ при $f = 1$.

Отметим, что доказательство сходимости разработанного алгоритма может быть выполнено аналогично доказательству, приведенному в [66].

С помощью предложенного алгоритма можно выбрать как оптимальное, так и несколько субоптимальных решений из множества всех вариантов отраслевых планов, построенных с помощью имитационной модели. Последующий перебор вариантов и построение окончательного плана, утверждаемого в качестве директивного задания предприятиям отрасли, осуществляются при непосредственном участии ЛПР.

В заключение отметим, что предложенные здесь имитационные процедуры практически реализованы в ОАСУ Укрчермет для расчетов вариантов плана производства продукции по некоторым предприятиям отрасли. Указанные варианты предлагаются специалистам Министерства для выбора наиболее эффективных и для формирования отраслевого плана. При этом задания ограничений на переменные модели, просмотр и отсеивание вариантов осуществляются в диалоговом режиме с использованием мини-ЭВМ типа «ИСКРА-226».

Анализ практических результатов показывает, что повышение точности и обоснованности планов даже для отдельных предприятий позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели работы отрасли. Внедрение всего комплекса имитационных моделей планирования производства продукции даст более 300 тыс. руб. экономического эффекта.

§ 3. Экономико-статистическая и балансовая модель производства агломерата

Характерной особенностью описанной выше модели вариантного планирования производства стали является то, что функциональные соотношения, связывающие входные и выходные переменные, в данном случае — объемы производства стали и факторы, на них влияющие, являются детерминированными.

Гораздо более сложными представляются модели, описывающие указанные связи с помощью разного рода стохастических и динамических функциональных соотношений.

В ОАСУ черной металлургии республики ведутся разработки имитационных моделей вариантного планирования производства агломерата и чугуна, в математических моделях которых присутствуют указанные соотношения. Остановимся вкратце на модели вариантного планирования агломерата, которая разра-

бывается в виде двухуровневой оптимизационной системы «предприятие — отрасль» [62]. В ней предусматривается использование моделей предприятий как источника информации для построения экономико-статистической модели отраслевого планирования производства агломерата, а также оптимизационной балансовой модели. Данные модели позволяют определять плановые объемы производства и качество агломерата, сбалансировав директивные задания с производственными возможностями отдельных объектов с учетом их мощностей, объемов и качества исходного сырья, а также ряда других ограничений.

Использование экономико-статистических моделей предприятий, являющихся источником информации для отраслевого уровня, позволяет:

а) учесть в отраслевой модели значительно больший круг факторов, влияющих на отраслевое производство агломерата;

б) оценить влияние таких факторов, которые не выражаются едиными показателями и непосредственно в отраслевую модель введены быть не могут (например, факторы эмерджентности и др.);

в) существенно расширить область поиска допустимых вариантов отраслевого плана за счет снижения трудоемкости их формирования и увеличения числа вариантов планов предприятий;

г) при имитации отраслевого плана учесть стохастическую природу переменных модели на основании отчетной информации, поступающей с предприятий.

Экономико-статистический анализ в предлагаемом подходе разбивается на 2 этапа.

1. Разработка вопросов построения статистических моделей предприятий, предназначенных для использования в качестве источника информации отраслевой модели;

2. Построение статистической модели отраслевого планирования, являющейся органической составной частью двухуровневой системы моделей «предприятие — отрасль».

Указанные два этапа качественно различны. Если в первом случае речь идет об автономном изучении деятельности предприятий изолированно друг от друга, то во втором — о моделировании их деятельности в составе отраслевой системы планирования.

Статистические модели функционирования отдельных предприятий записываются в виде системы уравнений, которые выражают зависимости между величинами, характеризующими различные стороны агломерационного производства. К основным переменным, учитываемым в моделях, следует отнести значения горячих и номинальных ленто-часов работы агломерационных машин, простой аглолент по различным причинам

(текущие, капитальные ремонты, аварийные), гранулометрический состав шихты, содержание железа и концентрата в шихте, расход топлива, химический состав и качество конечного продукта.

При имитационном планировании ЛПП накладывает ограничения на возможные значения переменных:

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad (7.9)$$

где $x_i \in X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ — множество входных переменных модели;

$$y_p^{\min} \leq y_p \leq y_p^{\max}, \quad (7.10)$$

где $y_p \in Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ — множество выходных переменных модели.

Математическую модель можно представить в виде линейных или нелинейных регрессионных уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_i &= \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} x_j, \quad i = \overline{1, n}; \\ \tilde{y}_i &= \sum_{j=1}^m \beta_{ij} x_j^{l-1}, \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

Задача оптимизации плана производства для каждого предприятия заключается в том, что для линейной зависимости

$$L = \sum_{j=1}^m a_j x_j \quad (7.12)$$

отыскивается вектор $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$, удовлетворяющий системам (7.9) — (7.10), и одновременно достигается экстремум (7.12).

Для упрощения имитационных исследований в разрабатываемой модели использовались линейные регрессионные зависимости, которые на основании статистических данных представляются в следующем виде: $Y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \dots + \alpha_m x_m$, где Y — объем производства агломерата; $x_1, \dots, x_m$ — факторы, влияющие на объем; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ — неизвестные параметры, характеризующие степень влияния каждого фактора. Обработка статистических данных и построение линейных зависимостей объема производства агломерата от основных технико-экономических факторов работы аглофабрик осуществлялись с помощью пакета прикладных программ «Статистика» ЕС ЭВМ.

Отметим, что одним из важнейших вопросов, возникающих в процессе экономико-статистических исследований, здесь является выбор факторов, наиболее существенно влияющих на функцию регрессии. Пренебрегая второстепенными факторами, мож-

но значительно сократить размерность математической модели и уменьшить соответственно объем имитационных экспериментов. Идея метода выбора наилучшего подмножества факторов заключается в том, что если какие-либо два фактора сильно коррелируемы, то часто бывает достаточно включения в модель одного из них.

Для решения данного вопроса использован алгоритм формальнологического поиска [51]. Здесь мы приведем пошаговое описание данного алгоритма.

Шаг 1. Все возможные регрессионные зависимости между Y и m факторами разбиваются на m классов. При этом первый класс состоит из $m(m-1)$ моделей вида $y = \alpha_0 + \alpha_i x_i$ ($i = \overline{1, m}$); второй класс — из $m(m-1)$ моделей вида $y = \alpha_0 + \alpha_i x_i + \alpha_j x_j$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, m}; i \neq j$) и т. д.; m -й класс — из единственной модели, учитывающей все факторы.

Шаг 2. Для всех уравнений регрессии вычисляется по известным формулам коэффициент детерминации R^2 , который оценивает тесноту связи между объемом производства агломерата и факторами, перечисленными в соответствующем уравнении.

Шаг 3. В каждом классе выбирается главное уравнение, т. е. уравнение с максимальным R^2 .

Шаг 4. Анализируются закономерности изменения R^2 при переходе от класса к классу и при этом отмечаются второстепенные факторы. Фактор считается второстепенным, если при переходе от класса с меньшим номером к классу с большим номером при включении дополнительной переменной максимальный коэффициент детерминации существенно не увеличится.

Таким путем будет построена модель, включающая «почти» независимые факторы. При имитационных исследованиях указанных моделей можно варьировать каждым фактором в отдельности, изучая ее влияние на реакцию независимо от других факторов.

Экономико-статистическая модель планирования в двух-уровневой системе агломерационного производства имеет вид

$$\sum_{j=1}^n S_j y_j \rightarrow \max; \quad (7.13)$$

$$D_j^{\min} \leq y_j = \sum_{i=1}^m A_i x_{ij} \leq D_j^{\max} \quad (j = \overline{1, n});$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq B_i \quad (i = \overline{1, m}); \quad (7.14)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \quad (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}),$$

где S_j — удельная прибыль на единицу продукции j -й аглофабрики; $D_j^{\min}, D_j^{\max}$ — лимиты на производство продукции j -й фабрики; A_i — вектор коэффициентов регрессионных оценок влияния факторов на производство продукции j -й аглофабрики; x_{ij} — вектор уровней технико-экономических факторов на i -й аглофабрике; B_i — отраслевые лимиты по i -му фактору. Отметим, что на отраслевом уровне лимитируются сырьевые и топливно-энергетические факторы.

Представленная модель (7.13) — (7.14) является исходной для проведения имитационных экспериментов с целью построения вариантов планов производства по отдельным фабрикам и по отрасли в целом. При имитации вариантов по каждой фабрике уровни факторов выбираются в пределах отраслевых лимитов, согласно методике, предложенной в предыдущем параграфе.

Для выбора наиболее эффективных вариантов из множества построенных в целом для отрасли можно также использовать алгоритм, описанный в предыдущем параграфе. Однако здесь необходимо предварительно решить задачу балансирования сырьевых ресурсов, распределяемых на отраслевом уровне между аглофабриками. Для формализации балансовой модели введем следующие обозначения: x_j — планируемый объект производства на j -м предприятии; $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$, так как на каждом предприятии может производиться k продуктов. Для выполнения плана i -му предприятию необходимо L_r объема r -го вида сырья, где

$$L_r = \sum_{s=1}^l P_{js}^{(r)} x_{js} \quad (r = \overline{1, l}),$$

т. е. необходимо l видов сырья.

Сырье поставляется из n пунктов, которые по виду поступающего сырья разбиваются на l непересекающихся групп. Запасы и производство сырья r -го вида в целом по отрасли соответственно M_r , а производство и запас r -го вида сырья у i -го поставщика составляют $U_i^{(r)}$.

Для выполнения плана необходимо выполнение баланса по запасам сырья каждого вида:

$$\sum_{s=1}^m \sum_{j=1}^k P_{js}^{(r)} x_{js} \leq M_r \quad (r = \overline{1, l}). \quad (7.15)$$

Каждое предприятие должно получить для производства необходимое количество всех видов сырья с некоторым запасом:

$$\sum_{s=1}^k P_{is}^{(r)} x_{is} \leq \sum_{i=1}^m y_i^{(r)}, \quad (7.16)$$

где $P_{is}^{(r)}$ — коэффициент, показывающий, сколько необходимо r -го сырья j -му предприятию для производства единицы s -го продукта; $y_{ij}^{(r)}$ — объем поставок r -го вида сырья от i -го поставщика на j -е предприятие.

Пусть $q_{hl}^{(r)}$ — содержание h -го полезного компонента ($h = \overline{1, H}$) в единице r -го вида сырья из i -го пункта поставок $l = \overline{1, m_r}$, $r = \overline{1, R}$.

Тогда балансовые ограничения по качеству агломерационной шихты на j -й фабрике примут вид

$$B_{rj}^{\min} \leq \frac{\sum_{l=1}^{m_r} y_{ij}^{(r)} q_{hl}^{(r)}}{\sum_{l=1}^{m_r} y_{ij}^{(r)}} \leq B_{rj}^{\max} \quad (j = \overline{1, m}; r = \overline{1, R}). \quad (7.17)$$

Обозначим C'_{js} — затраты на производство единицы продукции, а C''_{ij} — «транспортные издержки + стоимость единицы сырья». Исходя из того что целью отрасли является минимизация производственных и транспортных затрат, получаем условие

$$\sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^k C'_{js} x_{js} + \sum_{i=1}^{m_r} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^m C''_{ij} y_{ij}^{(r)}. \quad (7.18)$$

Таким образом, при ограничениях (7.15) — (7.17) составляется баланс использования сырья на производство агломерата, при котором достигается минимум критерия (7.18).

Отметим, что баланс составляется для вариантов плана производства агломерата, построенных с помощью имитационных экспериментов с экономико-статистической моделью (7.13) — (7.14).

§ 4. Отраслевое планирование перевозок железорудного сырья методами оптимизации и имитационного моделирования

В составе комплексов задач технико-экономического планирования в ОАСУ черной металлургии наиболее важными являются задачи, связанные с планированием добычи, потребления и транспортировки железорудного сырья [21]. Поскольку добыча железорудного сырья осуществляется на рудниках и горно-обогатительных комбинатах отрасли, а потребителями в основном являются доменные цехи металлургических заводов, то задачи планирования перевозок решаются на транспортной сети, связывающей прежде всего перечисленные конечные пункты.

Такую сеть можно представить в виде графа $G(M, S)$, где M — множество станций сети, состоящее из M_1 — подмножества станций примыкания горнодобывающих предприятий (поставщиков); M_2 — подмножество станций примыкания металлургических предприятий (потребителей) и $M_3 = M \setminus (M_1 \cup M_2)$ — подмножество промежуточных узловых станций транспортной сети. Дуги M_1, M_2 представляют собой транспортные магистрали, связывающие конечные и промежуточные пункты транспортной сети.

Задача отраслевого планирования поставок железорудного сырья на сети G решается в два этапа. На первом этапе определяются объемы перевозки сырья от поставщиков к потребителям, исходя из его потребностей, наличия и ряда технологических ограничений и требований, предъявляемых к качеству, содержанию железа и т. п.

Критерием оптимальности такой задачи может служить минимум транспортных затрат, который запишется в виде

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} x_{ij} C_{ij} \rightarrow \min. \quad (7.19)$$

Ограничениями задачи служат следующие функциональные соотношения:

$$\sum_{j \in N_2} x_{ij} \leq Z_i, \quad i \in N_1; \quad (7.20)$$

$$\sum_{i \in N_1} x_{ij} \geq A_j, \quad j \in N_2; \quad (7.21)$$

$$\alpha_j^{\min} \leq \frac{\sum_{i \in N_1} x_{ij} \alpha_i}{\sum_{i \in N_1} x_{ij}} \leq \alpha_j^{\max}; \quad (7.22)$$

$$x_{ij} \geq 0. \quad (7.23)$$

Здесь N_1 и N_2 — множества поставщиков и потребителей железорудного сырья. Указанные множества перед началом оптимизационных расчетов формируются следующим образом. Предварительно ЛПР задает матрицу жестких прикреплений $R = \|r_{ij}\|$, в которой элементы r_{ij} принимают значения

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й поставщик жестко прикреплен к } j\text{-му потреби-} \\ & \text{телю;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Жесткие прикрепления задаются ЛПР по некоторым организационно-технологическим или транспортным условиям. Например, Камыш-Бурунский горнообогатительный комбинат жестко прикреплен к заводу «Азовсталь», поскольку первый имеет единственную транспортную связь — морской путь — с указанным заводом.

Для условий жестких прикреплений все сырье i -го поставщика отправляется j -му потребителю, а поставщики, не имеющие жестких прикреплений, и потребители, не удовлетворенные сырьем от прикрепленных поставщиков, включаются в множества $N_1 \subseteq M_1$ и $N_2 \subseteq M_2$. Далее в модели (7.19) — (7.23) использованы обозначения

x_{ij} — объем поставок сырья от i -го поставщика к j -му потребителю; C_i — стоимость перевозки единицы i -го вида сырья на 1 км; l_{ij} — расстояние между i -м и j -м поставщиками; Z_i — запас (производство) сырья i -м поставщиком в плановый период; A_j — потребность в сырье j -го потребителя; α_i — содержание железа в сырье i -го поставщика; $\alpha_j^{\min}, \alpha_j^{\max}$ — допустимые границы колебаний содержания железа в смеси сырья, поступающего j -му потребителю.

Отметим, что кроме ограничения (7.22) в модель при конкретных расчетах могут вводиться и другие технологические ограничения, например ограничения на минимальный и максимальный объемы и соотношения поставок того или иного вида сырья.

Задача в постановке (7.19) — (7.23) является типичной задачей линейного программирования. Для условий черной металлургии республики ее размерность не превышает 300×300 , и поэтому решение задачи с использованием известных методов и пакетов прикладных программ принципиальных трудностей не встречает.

На следующем этапе отраслевого планирования перевозок решается задача маршрутизации движения составов с железнодорожным сырьем на транспортной сети G . Для решения поставленной задачи можно использовать методы имитационного моделирования, успешно применяемые для подобного класса задач [24, 71].

Как указывалось выше, методика проведения имитационных экспериментов с моделями производственно-экономических систем требует выполнения ряда необходимых процедур. Наиболее важными из них являются: разработка математической модели объекта, моделирующего алгоритма, который реализует в ЭВМ системное время, соответствующее реальному, а также проведение непосредственно имитационных экспериментов и обработка их результатов.

Остановимся более подробно на разработке математической модели применительно к поставленной задаче. Объединим железнодорожные составы, осуществляющие перевозку сырья по сети G в множество $B = \{1, 2, \dots, b\}$. Каждому элементу $i \in B$ соответствуют максимально допустимая грузоподъемность состава q_i и скорость движения V_i , которая в нашей модели является случайной величиной с заданными параметрами распределения

Для учета зависимостей параметров распределения V_i и в частности математического ожидания $\bar{V}_i$ от характеристик перегона, по которому движется состав (загруженность, топология, качество полотна) задается матрица

$$D = \|d_{ff}\|, f, j \in M; f \neq j,$$

где d_{ff} — эмпирический коэффициент, с помощью которого простым умножением корректируется средняя скорость движения состава на перегоне между j -м и f -м пунктом транспортной сети.

Аналогично задается матрица расстояний $S = \|S_{ff}\|$; $j, f \in M$; $f \neq j$, где S_{ff} — расстояние между j -м и f -м пунктами сети G .

Маршрут движения i -го состава ($i \in B$) характеризуется конечными пунктами, т. е. поставщиком и потребителем сырья, а также промежуточными узловыми станциями транспортной сети. Таким образом, его можно представить в виде упорядоченного множества $W_i = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$, где P_1, P_k — начальный и конечный пункты движения, а $P_2, P_3, \dots, P_{k-1}$ — последовательность промежуточных узловых станций. Расстояние движения по маршруту W_i имеет вид

$$L_i = \sum_{P_j, P_{j+1} \in W_i} S_{P_j P_{j+1}}. \quad (7.24)$$

Отметим, что начальный и конечный пункты (поставщик и потребитель) движения каждого состава однозначно определяются при решении задачи планирования поставок железорудного сырья (7.19) — (7.23). Промежуточные станции и временные характеристики маршрута будут построены в процессе имитационного моделирования.

Маршрут движения состава и его характеристики, таким образом, являются управляемыми переменными модели. Управляющими (независимыми) переменными служат скорости движения и соответственно длительности перемещения составов на отдельных участках транспортной сети.

Выходной (исследуемой) переменной может служить какой-либо технико-экономический показатель (например, суммарный грузооборот составов), рассчитываемый на плановый период времени T . Указанная переменная является функцией входных (управляемых и управляющих) переменных и параметров модели:

$$Z = F(W_i, L_i, D, V). \quad (7.25)$$

Очевидно, что в процессе имитационных экспериментов необходимо построить графики перевозок сырья на транспортной сети таким образом, чтобы за период времени T были обеспечены

поставки, запланированные согласно решению задачи (7.10) (7.23) и при этом по возможности достигли максимума (7.25).

На переменные параметры имитационной модели, в первую очередь на временные характеристики маршрутов, накладываются ограничения, учитывающие длительность обработки составов у поставщиков и потребителей. Кроме того, для упрощения экспериментов в модели не имитируются обратные перевозки грузов. Ограничение на время нового поступления в поставщика состава, закончившего маршрут у потребителя, является следующим образом. В самом начале моделирования в множество B включаются все составы, занятые на перевалке железнодорожного сырья на сети G . Каждому из них соответствует ограничение на минимальный момент времени поступления состава к поставщику. Указанные моменты для всех составов записываются в виде вектора $t = (t_1, t_2, \dots, t_b)$. В случае, если в начале моделирования нет данных о фактическом состоянии транспортной ситуации, то компонентам вектора t присваиваются значения нуль. Если в процессе моделирования некоторый i -й состав закончил свой маршрут и длительность его прохождения составила θ_i ($\theta_i \approx L_i/\bar{V}_i$), то соответствующая компонента вектора t принимает значение

$$t_i := t_i + 2\theta_i. \quad (7.26)$$

Таким образом, i -й состав может участвовать в перевалке железорудного сырья начиная с момента времени, равного новому значению t_i .

Остановимся теперь на моделирующем алгоритме, реализующем основные соотношения имитационной модели (7.24) (7.26). Прежде всего отметим, что системное время в алгоритме организовано по принципу «особых состояний», наиболее подходящему к имитации моделей подобного класса.

Работу алгоритма и корректировку системного времени мы подробно опишем на одной промежуточной итерации.

Каждая итерация начинается с просмотра подмножества $(M \setminus M_1)$ пунктов транспортной сети G , т. е. просматриваются все пункты сети, кроме поставщиков сырья. Из просматриваемого подмножества выбирается пункт, в котором находится i -й состав с минимальным временем прибытия: $\tau_i = \min_{j \in (M \setminus M_1)} \{t_j\}$.

Множество $\{\tau_i : i \in (M \setminus M_1)\}$, так же как и вектор t в модели, служит массивом «особых состояний». После нахождения пункта с минимальным значением τ_i последняя величина сравнивается с элементами вектора t и строится множество G номеров пунктов $t_j \leq \tau_i : G = \{j/j \in B; t_j \leq \tau_i\}$. Затем рассматриваются три возможные ситуации.

1. $G \neq \emptyset$, т. е. имеется хотя бы один состав, готовый к погрузке у поставщиков раньше, чем какой-либо грузовой состав

прибывает на P_{k-1} -ю промежуточную станцию. В таком случае выбирается r -й состав, для которого $t_r = \min_{j \in G} \{t_j\}$ и производится условная погрузка и отправка r -го состава. Для упрощения алгоритма составы могут быть заведомо прикреплены к поставщикам. Если реальные условия не позволяют этого сделать, то производится моделирование выбора поставщика по специальному алгоритму. На особенностях данного алгоритма здесь мы останавливаться не будем.

Условная погрузка и отправка r -го состава от станции при-
мыкания l -го поставщика к ближайшей k -й узловой станции
заключается в пересчете времени нахождения состава на мар-
шруте. Момент времени прибытия состава на k -ю станцию рас-
считывается по формуле

$$\tau_k^r = t_r \cdot |a_{lr}| \cdot \frac{S_{lk}}{V_r} d_{lk}, \quad (7.27)$$

где a_{lr} — длительность погрузки и отправки r -го состава от l -го поставщика.

Отметим, что момент времени $\tau_k^{(r)}$ заносится в массив «особых состояний» на место, соответствующее k -й узловой станции.

При расчете по формуле (7.27) величины a_{lr} и V_r , являющиеся случайными с известными параметрами распределений, генерируются с помощью соответствующих случайных чисел.

Отметим, что после всех пересчетов компонента t_r исключается из рассмотрения на последующих итерациях путем присвоения ей значения достаточно большого числа $t_r = \Delta$ ($\Delta > T$) и осуществляется переход к поиску нового минимального значения t_i .

2. При условии, что $G = \emptyset$, проверяется принадлежность $i \in M_2$. Если последнее условие не выполняется, т. е. выбранный пункт сети G является промежуточной узловой станцией, то производится выбор следующей станции, в которую необходимо направить состав. При этом выбираемая станция должна принадлежать одному из возможных маршрутов перевозки сырья, соединяющему поставщика, у которого погружен состав, с поставщиком, которому согласно решению задачи (7.19) — (7.23) данное сырье предназначается. Если возможных станций назначения состава окажется несколько, то выбор одной из них производится по критерию, обеспечивающему в конечном итоге минимальное время прохождения всего маршрута. При этом учитывается расстояние от выбираемой станции к конечному пункту назначения, т. е. реализуется в некотором смысле принцип оптимальности динамического программирования, а также рассматриваются возможные ситуации, возникающие к моменту прибытия состава на станцию. В частности, в модели можно пре-

дусмотреть имитацию возможных задержек составов на станциях при наличии статистических параметров законов распределения фактических задержек.

После выбора по указанному критерию очередной j -й станции направления r -го состава производится пересчет времени продвижения состава по маршруту

$$\tau_i^{(r)} = \tau_i^{(r)} + \frac{S_{ij}}{V_{ij}} d_{ij} + e_{ij}. \quad (7.28)$$

Здесь e_{ij} — случайная величина задержки i -го состава на j -й станции.

Отметим, что величина V_{ij} в (7.28) по аналогии с [9] генерируется как случайная, а полученное значение $\tau_i^{(r)}$ заносится в массив особых состояний.

3. Третья возможная ситуация возникает при $G = \emptyset$ и $i \in M_2$, т. е. в случае, если i -й пункт является станцией примыкания потребителя и r -й состав прибыл на разгрузку. В этом случае производится фиксация всего маршрута продвижения r -го состава в виде множества W_r , расстояния L_r , длительности продвижения $\sum_{i \in W_r} \tau_i$, а также значение выходной переменной

Z , которая суммируется по всем прибывающим к пунктам назначения составам. Если в качестве таковой выбран суммарный грузооборот, то подсчет ведется по формуле:

$$Z := Z + L_r q_r. \quad (7.29)$$

Моделирование заканчивается в тот момент, когда очередное значение τ_i превысит длительность планового периода.

Как указывалось выше, целью имитационных экспериментов с приведенной моделью является построение графиков перевозки железнодорожного сырья на сети G , обеспечивающих по возможности максимальное значение выходной переменной (комплексного критерия) Z . Модель позволяет также проводить исследование описанной транспортно-технологической системы с целью установления оптимальных ее параметров. При этом целесообразно провести исследование по установлению зависимости выходной переменной от грузоподъемности составов, скорости их продвижения на отдельных участках транспортной сети, длительности погрузочно-разгрузочных работ и задержек составов на промежуточных станциях. Для обработки результатов имитации используются обычно известные методы планирования экспериментов и дисперсионного анализа.

§ 5. Перспективы создания отраслевой автоматизированной системы имитационного планирования

Описанные в данной главе имитационные модели отраслевого планирования продукции и маршрутизации перевозок сырья могут входить составной частью в отраслевую автоматизированную систему имитационного планирования (ОАСИП). Такая система может быть разработана по аналогии с известными УАИМ [11]. Как подчеркивается в [56], системы, ориентированные на использование имитационных моделей и включающие информационное обеспечение и задачи оптимизации, целесообразно создавать на всех уровнях управления народным хозяйством.

Вопросы создания ОАСИП на отраслевом уровне управления в настоящее время становятся весьма своевременными по ряду следующих причин.

1. Необходимости унификации имитационных моделей, используемых для планирования производства различных видов продукции и ее транспортировки как на отраслевом уровне, так и на уровнях предприятий и объединений.

2. Обеспечения единой статистической и нормативно-справочной информацией различных имитационных моделей в системе.

3. Обеспечения ЛПР прямого доступа к параметрам и переменным моделей для целей их корректировки, а также его непосредственного участия в формировании и отсеивании вариантов планов.

Создание ОАСИП особенно актуально в отраслях, производящих в массовом количестве однородную по номенклатуре продукцию одновременно несколькими специализированными предприятиями. Например, в черной металлургии, где большое количество металлургических заводов производит такие виды однородной продукции, как чугун, сталь, прокат; горнообогатительные комбинаты — руду, агломерат, окатыши; коксохимические заводы — кокс.

Предпосылками внедрения ОАСИП как новой информационной технологии [28] здесь служат следующие возможности:

- наличие общей информационной базы, позволяющей формировать на единой основе исходные данные для имитационных процедур, используемых при планировании всех видов металлургической продукции;

- возможность создания унифицированных моделей статистической обработки отчетных данных по производству, использованию ресурсов и технико-экономическим показателям работы предприятий отрасли;

возможность создания унифицированных математических моделей, моделирующих алгоритмы и другие принципы имитационного моделирования для формирования вариантов планов.

наличие развитого комплекса технических средств, позволяющего организовать диалог ЛПР и ЭВМ как на этапе формирования ограничений и вариантов планов по предприятиям, так и при разработке окончательного директивного плана производства.

В ОАСУ черной металлургии республики ОАСПП разбивается в составе семи относительно независимых блоков, несущих кроме подготовки, проведения и анализа результатов имитационных экспериментов также определенные функции, связанные с обеспечением управленческой информацией министерства. Примерный вид структурной схемы ОАСПП показан на рис. 7.2.

Коротко осветим основные функции каждого блока системы, а также некоторые особенности их технической и программной реализации. Блок сбора отчетных данных осуществляет сбор и первичную обработку информации с предприятий о фактическом выполнении плановых показателей по производству продукции, уровню использования ресурсов и производственных мощностей, а также различных экономических показателей работы предприятий за отчетный период. Сбор и передача данных осуществляются как телекоммуникационными средствами, так и межмашинным обменом с предприятиями, включенных в автоматизированную систему диспетчерского управления в отрасли. Блок состоит из комплекса унифицированных программ, осуществляющих ввод в ЭВМ, первичный контроль отчетных данных, диагностику ошибок, возникающих при подготовке и передаче информации по каналам связи. В блоке осуществляется запись в базу данных показателей, необходимых для анализа и планирования работы предприятий и отрасли. Для организации последней процедуры имеет смысл использовать, какую либо из современных систем управления базами данных (СУБД). В частности, в ОАСУ черной металлургией Украины использована для этих целей СУБД «ОКА».

Второй блок, связанный с предыдущим посредством базы данных, производит пофакторный анализ выполнения плана предприятий по производству продукции и использованию ресурсов путем сравнения отчетных данных с планами и нормативными показателями и последующей балансировкой отклонений. Основное назначение блока — это выдача в отраслевой орган управления информацией по анализу выполнения плана и причинам отклонений. Кроме того, в блоке осуществляется запись в базу данных ОАСПП с помощью СУБД некоторых аналитических показателей и сбалансированных отклонений

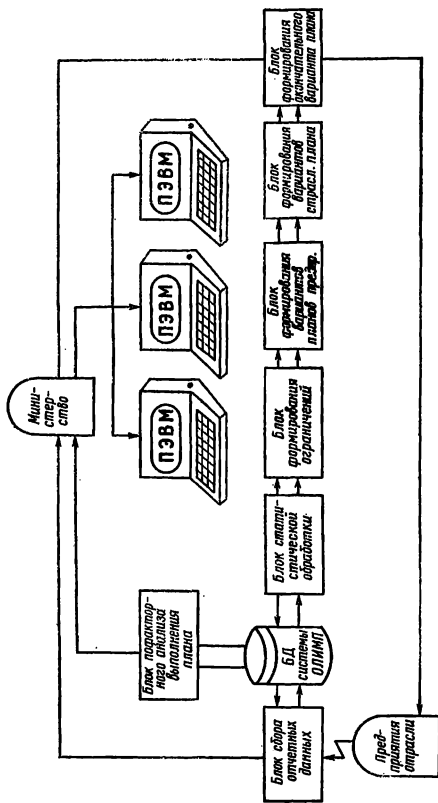


Рис. 7.2. Структурная схема системы имитационного планирования ОАСИП

необходимых в дальнейшем для имитационного планирования.

Блок статистической обработки к началу периода планирования осуществляет статистическую обработку отчетных и аналитических показателей, хранящихся в базе данных. Здесь подсчитываются выборочные средние и дисперсии показателей, участвующих в формировании уровней факторов для имитационных экспериментов. При этом выборки формулируются из ежемесячных отчетных данных не только за базисный период. Известно, что при традиционных методах годового планирования в n -м году в качестве базового периода используется $n - 1$ год и все показатели отраслевого плана на $n - 1$ год рассчитываются в зависимости от уровня, достигнутого в $n - 1$ году. В предлагаемой схеме расчета плана выборки для статистических совокупностей расширяются за счет имеющихся к началу планирования отчетных данных n -го года, а также рассчитанных ранее статистических параметров для $n - 2$ года. Здесь же статистические параметры законов распределения случайных показателей $n - 1$ -го года заносятся в базу данных для использования при имитационном планировании в последующие годы. В качестве программных средств в блоке могут быть использованы как специализированные пакеты прикладных программ для статистической обработки, так и программные модули индивидуального использования, разработанные применительно к конкретным показателям.

В блоке формирования ограничений на уровни факторов и на использования ресурсов с помощью ЛПП прежде всего формируется факторный план имитационных экспериментов. При этом с помощью специальных программных модулей и при учете ЛПП задаются уровни факторов и определяются наиболее перспективные их сочетания для формирования вариантов планов по предприятиям. Бесперспективность отдельных сочетаний факторов позволяет снизить полноту факторного плана и соответственно уменьшить объем имитационных экспериментов. Отметим, что для технической реализации диалога «ЛПП-ЭВМ» можно использовать дисплейные системы, связанные непосредственно с ЕС ЭВМ, а также через микропроцессоры типа «М. Искра-226», которые в данном случае выполняют функции интеллектуальных терминалов [32].

В блоке формирования вариантов планов по каждому предприятию с помощью имитационных процедур формируются варианты для всех перспективных сочетаний уровней факторов, оставленных в предыдущем блоке. Количество реализаций (реплик) каждого варианта может быть определено заранее с помощью методов дисперсионного анализа. Этими же методами производится статистическая обработка совокупностей репликаций и проверка гипотез о пригодности полученных вариантов

Построенные таким образом варианты предлагаются ЛПР для оценки возможности их использования в отраслевом плане. Техническая реализация диалога может быть осуществлена аналогично выполненной в предыдущем блоке.

Из допустимых вариантов планов предприятий в следующем блоке формируются варианты отраслевого плана. Здесь же производится предварительное отсеивание вариантов, не удовлетворяющих директивному заданию по плану производства и основным технико-экономическим показателям. Отсеивание производится автоматически, если в строящемся варианте не выполняются какие-либо контрольные цифры и при участии ЛПР, который может отбрасывать варианты по каким-либо интуитивным соображениям невзирая на то, что они удовлетворяют основным отраслевым ограничениям. Множество допустимых вариантов может оказаться достаточно большим, поэтому в следующем блоке решается задача выбора одного или нескольких наиболее эффективных вариантов, которые будут служить базовыми для формирования окончательного отраслевого плана. Задача может решаться с использованием некоторых оптимизационных процедур, например методами целочисленной оптимизации, как это было описано выше. Формирование окончательного отраслевого плана производства однородной продукции также предусматривается в диалоговом режиме при участии ЛПР.

В заключение отметим, что основные процедуры и программные модули, используемые во всех блоках описанной системы, могут быть унифицированы по отношению к задачам планирования различных видов продукции. Это позволяет значительно ускорить процесс разработки и внедрения задач имитационного планирования и существенно повысить качество принимаемых плановых решений и их эффективность.

§ 6. Некоторые вопросы информационного обеспечения имитационных систем

Имитационные системы, предназначенные для моделирования производственно-экономических процессов и принятия управленческих решений, являются составной частью автоматизированных систем обработки информации (в самом широком понимании смысла обработки) и немыслимы без всех необходимых атрибутов современных АСУ, в частности без создания баз данных. Как известно, базы данных представляют собой новый шаг в развитии средств обработки данных, который содействует расширению области применения ЭВМ и способствует лучшему, более качественному и более широкому использованию информации.

В общепринятом понимании база данных есть организованная совокупность данных, используемых для справок и для дальнейшей обработки, представляющее собой одну и ту же информацию для ряда личных нужд и разным пользователям. Причем информация в БД должна обязательно быть достоверной и актуальной и, по определению [44], базы должны служить как бы «информационным звеном» между событиями как причинами управленческих воздействий и самими этими воздействиями.

Организация базы данных ориентирована на информационные обмены между источником информации и базой данных, с одной стороны, и между пользователями и базой данных, с другой стороны.

При организации современных баз данных необходимо соблюдать ряд основополагающих принципов, которые подробно освещены в фундаментальной работе [52]. Здесь мы рассмотрим особенности формирования базы данных для имитационных систем, и в частности реализации важнейшего принципа независимости данных.

Очевидно, что любая база данных должна быть в определенной степени открытой системой как для новых источников информации, так и для новых пользователей. Пользователь мы будем здесь идентифицировать с прикладными программами формирующими конкретные функциональные наборы выходных показателей, ориентированных на реального пользователя. Степень «открытости» системы определяет конкретные возможности в развитии и модификации базы данных в зависимости от изменения структуры входной информации и появления новых пользователей. Определяется степень «открытости» системы уровнем независимости данных или степенью их изолированности от прикладных программ.

Известно, что принцип независимости данных определяет некоторый суверенитет базы данных от программ обработки первичной информации и прикладных программ пользователей, что позволяет создавать базы данных, общие для подсистем и комплексов задач различного функционального назначения [39].

Имитационные модели в системах управления производством, однако, не всегда целесообразно ориентировать на имеющиеся базы данных, разработанные для других подсистем и блоков функциональных задач. Другими словами, для имитационных систем независимость данных должна быть достаточно ограничена, так как здесь обычно требуется интенсивный двухсторонний обмен информацией между базой данных и прикладными программами имитационных процедур. При этом пользование данными других (неимитационных) программ становится весьма затруднительным и его, по всей видимости, следует максимально ограничивать.

С другой стороны, разработка имитационных систем с четко определенным перечнем данных и требованиями достаточно хорошей изоляции от функционирующих комплексов задач другого назначения вряд ли реальна без существенного изменения имеющихся баз данных. Реконструирование базы данных в известных СУБД «ОКА», «Пальма» ИНЭС и др. требует существенной переработки программ пользователя, что зачастую невозможно.

Таким образом, при разработке комплексов имитационных моделей в составе функционирующих автоматизированных систем обработки информации и управления производством имеет смысл создавать собственные базы данных [64].

В предыдущем параграфе приведен пример имитационной системы с собственной базой данных, обладающей определенным суверенитетом по отношению к неимитационным блокам задач автоматизированного управления отраслью, но с ограниченной независимостью данных от имитационных процедур планирования производства различных видов металлургической продукции. Это резко повышает реакцию системы при весьма незначительной избыточности информации. Как отмечалось выше, для управления БД в указанной системе была использована СУБД «ОКА», с помощью которой на логическом уровне обеспечивается доступ к информации как прикладных программ актуализации данных, так и программ статистической обработки информации и различных имитационных процедур.

Остановимся несколько подробнее на перспективах распределенной обработки данных в имитационных системах. Известно, что распределенная обработка информации становится воз-

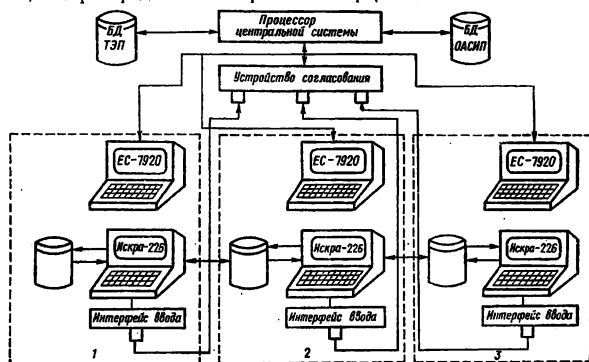


Рис. 7.3. Конфигурации семи линий ЭВМ для распределенной обработки информации в ОАСИП.

можной при наличии сетей мини- и микро-ЭВМ и является весьма перспективным направлением совершенствования систем обработки данных и АСУ [16].

В имитационных системах распределения обработки информации особенно необходима для обеспечения диалогового режима общения ЛПР с ЭВМ при имитации производственных экономических процессов и управленческих решений [16]. Очевидно, что интерактивный режим функционирования имитационной системы гораздо проще обеспечить при наличии мини (микро)-ЭВМ, связанной с процессором центральной системы, управляющим базами данных АСУ. На рис. 7.5 показан пример конфигурации сети мини-ЭВМ, разработанной применительно к описанной выше имитационной системе ОАСПП.

Следует отметить, что современные мини-ЭВМ, в частности применяемые в описанной системе ИСКРА-226, обладают развитыми средствами поддержки диалога «ЛПР-ЭВМ». В условиях ограниченных возможностей прямого доступа в ЭВМ центральной системы использование мини-ЭВМ дает много преимуществ, особенно при реализации имитационных моделей, когда пользователю требуется весьма частое вмешательство в процесс обработки информации (ввод различных корректив, изменение уровней факторов, количества параллельных расчетов и пр.) на всех стадиях имитационного эксперимента. При этом на мини-ЭВМ организовываются локальные базы данных, ориентированные на конкретного пользователя проблемно-ориентированных имитационных моделей. Перекачка информации из баз данных системы в локальные базы данных осуществляется в любое удобное для центральной системы время при наличии разрешения на прямой доступ.

Из рис. 7.5 можно также заметить, что конфигурация технических средств не исключает возможности пользователям иметь прямой доступ к базе данных центральной системы по средствам имеющихся у них дисплеев. Другими словами, при необходимости ЛПР может запрашивать из центральной системы любую информацию, имеющуюся в базе данных, особенно если она не относится к данным, используемым в имитационных моделях.

В заключение отметим, что вопросы создания баз данных и децентрализованной обработки информации в имитационных системах, используемых на всех уровнях управления производственно-транспортными объектами, являются весьма актуальными и требуют большого внимания со стороны разработчиков и пользователей указанных систем. Степень автоматизации обработки первичной информации, уровень ее достоверности и актуальности определяют в конечном счете эффективность управленческих решений, принимаемых по результатам имитационных экспериментов.

1. Аев О. И. Автоматизация процессов управления.— М.: Знание, 1983.— 64 с.
2. Багриновский Н. А., Бусыгин В. П. Математика плановых решений.— М.: Наука, 1980.— 224 с.
3. Бакаев А. А., Костина Н. И., Яровицкий Н. В. Автоматные модели экономических систем.— Киев: Наук. думка, 1970.— 192 с.
4. Бакаев А. А., Костина Н. И., Яровицкий Н. В. Имитационные модели в экономике.— Киев: Наук. думка, 1978.— 297 с.
5. Бакаев А. А., Гриценко В. И., Михалевич В. С. Современное состояние и проблемы автоматизации комплексного управления разными видами транспорта.— Киев: ИК АН УССР, 1982.— 28 с.
6. Балаш Э. Аддитивный алгоритм для решения задач линейного программирования с переменными, принимающими значения 0 или 1 // Кибернет. сб.— 1969.— № 6.— С. 217—258.
7. Беллман Р., Грикенберг И., Гросс О. Некоторые вопросы математической теории процессов управления.— М.: Изд-во иностр. лит., 1962.— 335 с.
8. Белостоцкий А. А., Гершвальд А. С. Автоматизация слежения за движением транспорта // Пром. трансп.— 1973.— № 7.— С. 31—33.
9. Берников А. Р., Когон М. Г. Имитационная модель судовой силовой установки // Управляющие системы и машины.— 1984.— № 3.— С. 113—116.
10. Брайковский Н. О., Грановский Б. И. Моделирование транспортных систем.— М.: Транспорт, 1978.— 125 с.
11. Бусленко В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем.— М.: Наука, 1977.— 143 с.
12. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов на цифровых вычислительных машинах.— М.: Наука, 1964.— 362 с.
13. Бусленко Н. П., Калашников В. В., Коваленко И. Н. Лекции по теории сложных систем.— М.: Сов. радио, 1973.— 440 с.
14. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем.— М.: Наука, 1978.— 340 с.
15. Вальденберг Ю. С., Белостоцкий А. А., Абизов Р. М. Вычислительная техника на промышленном транспорте.— М.: Сов. радио, 1970.— 117 с.
16. Вейцман К. Распределенные системы мини- и микро-ЭВМ.— М.: Финансы и статистика, 1983.— 382 с.
17. Влазов С. А. Имитационное моделирование в задачах интегрированного проектирования // Интегр. проектирование автоматизир. технол. комплексов.— 1981.— № 27.— С. 33—39.
18. Гизатуллин Х. Н. Вопросы построения математических моделей оптимизации в больших системах черной металлургии // Математические методы в некоторых задачах оптимального планирования.— Свердловск: УНЦ АН СССР, 1971.— С. 3—47.

19. *Гирик А. И., Калинин В. Ф., Пиничан А. А.* Имитационная модель выбора критериев оптимальности управления в АСУ карьерным железнодорожным транспортом // Физ.-техн. пробл. расч. и констр. ископаемых.— 1979.— № 3.— С. 85—91.
20. *Гирик А. И., Садовский А. В.* Двухкритериальный алгоритм распределения автотранспорта в условиях АСУ ТК карьера // Горн. журн.— 1982.— № 1.— С. 44—46.
21. *Гликман Э. С., Зайцев Х. П.* Организация и планирование производства в доменных цехах и на агломерационных фабриках М.: Металлургия, 1979.— 138 с.
22. *Гольштейн Е. Г., Юдин Б. Д.* Новые направления в линейном программировании.— М.: Сов. радио, 1966.— 523 с.
23. *Глушков В. М., Ермолов Ю. М.* Задача синхронизации производства / Кибернетика.— 1976.— № 5.— С. 1—4.
24. *Гриценко В. И., Лапа А. П.* Об одной модификации метода условного моделирования передвижений подвижного состава на железнодорожной сети // Проблемы планирования и управления транспортом Киев: ИК АН УССР, 1974.— С. 11—18.
25. *Гриценко В. И., Лапа А. П.* Принципы структурного построения информационно-управляющих систем для промышленного железнодорожного транспорта // Автоматизированные системы управления на транспорте.— Киев: ИК АН УССР, 1981.— С. 11—17.
26. *Гриценко В. И., Назаренко Н. А.* Оперативное управление транспортными перевозками в многофазной системе снабжения // Управляющие системы и машины.— 1980.— № 4.— С. 12—13.
27. *Гриценко В. И., Панченко А. А.* Модели и алгоритмы решения транспортно-технологических задач в АСУ карьерным транспортом Киев: ИК АН УССР, 1982.— 68 с.
28. *Гриценко В. И., Паньшин Б. Н.* Методологические проблемы развития информационной технологии.— Киев: ИК АН УССР, 1981.— 66 с.
29. *Гурин Л. С., Дымарский А. С., Меркулов А. Д.* Задачи и методы оптимального распределения ресурсов.— М.: Сов. радио, 1968.— 464 с.
30. *Деловые игры в управлении и экономике строительства* / Под ред. В. И. Рыбальского, И. П. Сытника.— Киев: Вища шк., 1980.— 180 с.
31. *Дородницын А. А.* Проблема математического моделирования в оптимизационных науках // Кибернетика.— 1983.— № 4.— С. 6—10.
32. *Еремеев И. С., Кондаков А. И.* Интеллектуальные терминалы Киев: Техника, 1984.— 127 с.
33. *Жук К. Д.* О некоторых структурах в теории моделирования сложных систем // Электрон. моделирование.— 1983.— № 4.— С. 3—8.
34. *Иванов Ю. П., Лотов А. В.* Математические модели в экономике М.: Наука, 1979.— 302 с.
35. *Имитационное моделирование производственных систем* / Под общ. ред. А. А. Вавилова.— М.: Машиностроение, 1983.— 234 с.
36. *Инкович Э. Л., Никифоров И. В., Юрченко В. Е.* Принципы человеческого машинного проектирования производства химико-технологического типа // Приборы и системы упр.— 1985.— № 7.— С. 4—7.
37. *Карнаух В. Л., Кирий В. Г., Подкорытов В. Н., Сапунин М. М.* Логовая система имитационного моделирования // Управляющие системы и машины.— 1982.— № 2.— С. 116—119.
38. *Колесник А. В.* Моделирование работы автоматизированной системы управления индивидуальным транспортом // Эффективность и моделирование АСУ.— Киев: ИК АН УССР, 1980.— С. 16—30.
39. *Кокарева Л. В., Малашикин И. И.* Проектирование базисных данных М.: Наука, 1984.— С. 256.

40. *Кофман А.* Методы и модели исследования операций.— М.: Мир, 1967.— 392 с.
41. *Крушевский А. В., Швецов К. И.* Математическое программирование и моделирование в экономике.— Киев: Вища шк., 1979.— 456 с.
42. *Лащенко И. С.* Имитационные системы.— Новосибирск: Наука, 1981.— 300 с.
43. *Лапкина И. А.* Исследование распределения судов в морском порту средствами имитационного моделирования // УСиМ.— 1983.— № 2.— С. 127—129.
44. *Ложе И.* Информационные системы: Методы и средства.— М., Мир, 1979.— 632 с.
45. *Лопатин А. П., Павленко Г. П., Черныш З. Г.* Оперативная маршрутизация движения транспортных единиц // Кибернетика.— 1982.— № 4.— С. 94—97.
46. *Лотов А. В.* Введение в экономико-математическое моделирование.— М.: Наука, 1984.— 392 с.
47. *Луковский А. Б., Шмелевич М. И.* Об эффективном уровне автоматизации управления карьерным железнодорожным транспортом // Пром. трансп.— 1974.— № 2.— С. 27—29.
48. *Лутков В. И.* Имитационное моделирование и управление производством: (Обзор).— М.: МЦНТИ, 1978.— 60 с.
49. *Майдуков Г. Л., Дышкант В. Г.* Имитационное моделирование в системе планирования качества добываемого угля // Механизация и автоматизация упр.— 1982.— № 2.— С. 11—15.
50. *Макаров В. Л., Перминов С. В.* О некоторых аспектах моделирования процесса выполнения плана // Экономика и мат. методы.— 1979.— 14, вып. 2.— С. 156—164.
51. *Малолеткин Г. Н.* Об алгоритмах выбора наилучшего подмножества признаков в регрессионном анализе // Вопр. кибернетики.— 1973.— Вып. 35.— С. 110—148.
52. *Мартин Дж.* Организация баз данных в вычислительных системах.— М.: Мир, 1980.— 662 с.
53. *Математические методы в планировании отраслей и предприятий* / Под ред. И. Г. Попова.— М.: Экономика, 1973.— 375 с.
54. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических систем.— М.: Мир, 1973.— 390 с.
55. *Михалевич В. С., Волкович В. Л.* Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем.— М.: Наука, 1982.— 286 с.
56. *Моисеев Н. Н.* Имитационные модели // Наука и человечество.— М.: Знание, 1973.— С. 173—178.
57. *Моисеев Н. Н.* Математические задачи системного анализа.— М.: Наука, 1982.— 487 с.
58. *Моисеев Н. Н.* Элементы теории оптимальных систем.— М.: Наука, 1975.— 526 с.
59. *Моисеев Н. Н., Евтушенко Ю. Г., Краснощеклов П. С., Павловский Ю. Н.* Имитационные системы // Экономика и орг. пром. пр-ва.— 1973.— № 6.— С. 28—38.
60. *Мельцер М. И.* Диалоговое управление производством.— М.: Финансы и статистика, 1983.— 240 с.
61. *Нахимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов.— М.: Наука, 1965.— 340 с.
62. *Нападайло В. А., Панченко А. А., Балдина О. И., Фостиченко И. Г.* Вариантная система планирования агломерационного производства в условиях ОАСУ // Анализ и моделирование процессов управления в экономике.— Днепропетровск: ДГУ, 1981.— С. 26—32.
63. *Нейлор Т.* Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем.— М.: Мир, 1975.— 500 с.

64. Павлов А. И., Федунец А. Д. Вопросы моделирования транспортно-складских процессов // Управление в системах / Трансп. перераб. хранение материал. ресурсов. — Киев : НК АП УССР, 1981. С. 33—40.
65. Панченко А. А. Некоторые типовые задачи и алгоритмы управления в АСУ карьерным транспортом // Механизация и автоматизация упр. 1975. — № 2. — С. 18—22.
66. Панченко А. А. Некоторые алгоритмы решения частных задач линейного программирования с булевыми переменными // Кибернетика. 1975. — № 2. — С. 117—119.
67. Панченко А. А., Гирик А. И., Нападайло В. А. Метод оптимального планирования работы карьерного железнодорожного транспорта // Механизация и автоматизация упр. — 1974. № 4. С. 24—27.
68. Панченко А. А., Нападайло В. А. Имитационное моделирование производственно-экономических систем. — Днепродзержинск : ДДУ, 1980. 77 с.
69. Панченко А. А., Садовский А. В., Якунин А. А. Об одном подходе к созданию имитационной системы оперативного отраслевого планирования // Методы решения задач оператив. упр. в АСУ отрасли и междувед. уровней упр. : Материалы 3-го Всесоюз. симпозиума М. ВНИИПОУ, 1984. — С. 195—197.
70. Перминов С. В. Имитационное моделирование процессов управления в экономике. — Новосибирск : Наука, 1981. — 212 с.
71. Перминов С. В. Имитационное моделирование процессов составления годового плана отрасли // Оптимизация. — Новосибирск : Институт математики СО АН СССР, 1975. — С. 115—135.
72. Садовский А. В. Применение имитационного моделирования к задаче оперативного управления горнотранспортным комплексом ИнГК // АСУТП и АСУП в черной металлургии. — М., 1981. — С. 14—16.
73. Саульев В. К. Математические модели теории массового обслуживания. — М. : Статистика, 1979. — 195 с.
74. Тейл Г. Экономические прогнозы и принятия решений. — М. : Статистика, 1971. — 268 с.
75. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях. — М. : Мир, 1966. 276 с.
76. Форрестер Дж. Мировая динамика. — М. : Наука, 1978. 220 с.
77. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия. — М. : Прогресс, 1971. — 380 с.
78. Хедли Дж., Цайтин Т. Анализ систем управления запасами. М. : Наука, 1968. — 317 с.
79. Чулков В. П. О применении алгоритмических языков при моделировании сложных транспортных систем // Тр. Промтранспбурск. 1978. — Вып. 10. — С. 69—77.
80. Шевченко Ю. В., Панченко А. А. Математическая модель распределения плановых заданий между промышленными предприятиями // Промышленная кибернетика в черной металлургии. — Киев : НК АН УССР, 1974. — С. 12—17.
81. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. М. : Мир, 1978. — 418 с.
82. Шмелевич М. И. АСУ промышленным транспортом. — М. : Транспорт, 1974. — 410 с.
83. Шор Н. Э. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. — Киев : Наук. думка, 1979. — 200 с.
84. Шукайло В. Ф., Зинченко С. В., Чернышенко Ж. Г. Определение надежности функционирования системы управления складскими запасами в условиях двойной стохастичности // Механизация и автоматизация упр. — 1985. — № 2. — С. 36—39.

85. Юрченко В. Е. Проектирование системы управления усреднением сырья с помощью имитационного моделирования / Цемент.— 1981.— № 8.— С. 15—17.
86. Якунин А. А., Панченко А. А. Имитационная модель планирования производства металлургической продукции / Механизация и автоматизация упр.— 1981.— № 1.— С. 16—20.
87. Якунин А. А., Панченко А. А. Совершенствование планирования производства в ОАСУ Укрчермет / Металлург. и горноруд. пром-сть.— 1984.— № 2.— С. 69—71.
88. Яровицкий Н. В., Сакунова И. С. Исследование экономических связей с помощью имитационных моделей / Имитационные методы в АСУ : Сб. науч. тр.— Киев : ИК АН УССР, 1983.— С. 3—9.
89. Chu K., Naylor T. H. A dynamic model of the firm // Manag. Sci.— 1975.— N 11.— P. 49—62.
90. Discens I. H., Fraiser G. D. Linear programming in corporate models // TIMS college on simulation on corporate Simulation models.— Washington : univ. press, 1979.— P. 145—150.
91. Hunter J. S., Naylor T. H. Experimental designs for computer simulation experiments // Manag. Sci.— 1970.— N 16.— P. 287—296.
92. Kindler E. Simulační programovací jazyky.— Praha : SNTN, 1980.— 250 s.
93. Odon P. R., Shannon R. E. Nomographs for computer simulation // Ind. Eng.— 1973.— 5, N 11.— P. 142—148.
94. Zangwill W. I. A backlogging model of a dynamic economic lot size production system a network approach // Manag. Sci.— 1969.— 15, N 9.— P. 506—523.
95. Pritsker A. A., Pedgen C. D. Introduction to simulation and SLAM.— New York etc. : Wiley, 1979.— 400 p.

Монография

**Владимир Ильич Гринченко
Александр Андреевич Панченко
Алексей Петрович Лана**

**ПРОБЛЕМНО-
ОРИЕНТИРОВАННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНО-
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

*Утверждено к печати ученым советом
Института кибернетики
имени В. М. Глушкова АН УССР*

Редактор *М. К. Пунина*
Художественный редактор *И. П. Антипин*
Технический редактор *Г. М. Коваленко*
Корректоры *Т. А. Обора, Э. Я. Белокрытченко*

ИБ № 8831

Сдано в набор 08.12.86. Подп. в печ. 28.04.87. Изд. 000/0.
Формат 84×108/32. Бум. тип. № 1. Лист. гарн. 140. Уч.-изд. л. 84.
Усл. печ. л. 84. Усл. кр.-отг. 8,72. Уч. изд. л. 84.
Тираж 1000 экз. Заказ 3684. Цена 1 р. 40 к.

Издательство «Наукова думка», УССР) Киев 4, ул. Пунина, 3.

Отпечатано с матриц Главного предприятия республиканского производственного объединения «Политехника». 252057 Киев 57, ул. Горького, 1 в общегородской книжной типографии, УССР) Львов, ул. Стефанова, 11.