

ЗНАНИЕ

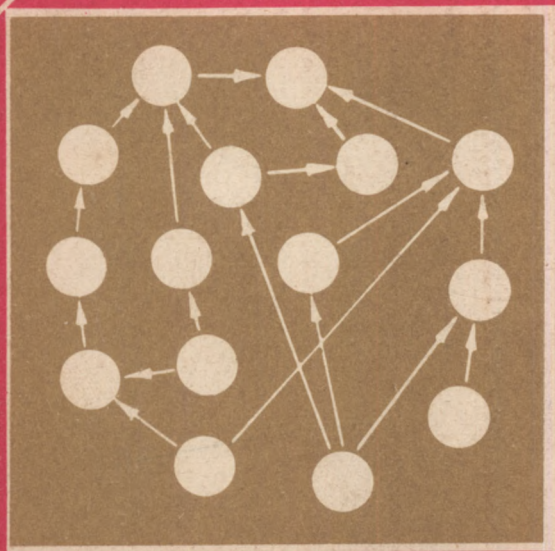
НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
МАТЕМАТИКА,
КИБЕРНЕТИКА

Н. Н. Моисеев

НЕФОРМАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3'79



**НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ**

**Серия
«Математика,
кибернетика»,
№ 3, 1979 г.**

**Издается
ежемесячно
с 1967 г.**

Н. Н. Моисеев,
член-корреспондент АН СССР

НЕФОРМАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Издательство
«Знание»
Москва
1979**

Моисеев Н. Н.

М74 Неформальные процедуры и автоматизация проектирования. М., «Знание», 1979.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Математика, кибернетика», 3. Издается ежемесячно с 1967 г.)

Автоматизация проектирования сложных технических и хозяйственных объектов стала одним из самых перспективных направлений использования электронно-вычислительной техники. Решение этой задачи связано с организацией человеко-машинного диалога и специальных неформальных процедур. Об этих процедурах и специфическом аппарате, необходимом для решения новых задач, рассказывается в брошюре.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

30502

32.96

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема принятия решений имела и имеет в жизни человека особое значение, ведь любая деятельность — это в конечном итоге цепочка принятия решений. Однако в подавляющем большинстве случаев процесс принятия решений, т. е. выбор одной из возможных альтернатив действия, не требовал привлечения каких-либо научных методов — ситуации были довольно просты и люди обходились опытом, традиционными навыками, интуицией.

Но иногда ситуации оказывались такими сложными, что у человека, принимающего решение, уже не было уверенности в том, что его выбор правильный. В таких случаях возникала необходимость в научных методах принятия решений. Постепенно эти методы развивались и к настоящему времени сложились в отдельную дисциплину — теорию принятия решений.

Трудно сказать, когда зародилась эта дисциплина. Ясно одно, что ее истоки — где-то в глубине человеческой истории — они появились вместе с зачатками военного искусства, торговли, производства и т. п.

Развитие теории принятия решений определялось, с одной стороны, развитием математического аппарата, появлением приемов формализации, а с другой — новыми задачами, возникавшими в промышленности, военном деле, экономике.

Особенно бурное развитие теории принятия решений началось после пятидесятих годов, когда на основе теории эффективности, теории игр, теории массового обслуживания появилась синтетическая дисциплина — «исследование операций», которая затем постепенно переросла в системный анализ.

Современная теория принятия решений имеет обширный инструментарий, включающий в себя развитой математи-

ческий аппарат и современные вычислительные системы. И все же, какие бы успехи ни делала теория принятия решений с помощью этих новейших современных методов, опирающихся на формализованное описание ситуаций, все еще остаются необходимыми, а подчас и играют решающую роль традиционные приемы анализа, использующие опыт и интуицию, способности человека к ассоциациям и многое другое, что лежит вне математики и пока еще не присуще искусственному интеллекту. Именно об этом и будет идти речь в нашей брошюре.

Очень важно показать, как эвристические, неформальные методы вписываются в современную теорию принятия решений, как они видоизменяются под влиянием того инструментария, которым теперь оснащена эта теория.

Обсуждаемый предмет очень широк. И слова «автоматизация проектирования», которые стоят в заглавии, призваны его несколько сузить. И все же термин «автоматизация проектирования» сегодня охватывает очень много различных по своему содержанию понятий. Среди них и чисто технологические: структура банков данных, средства автоматизации графических работ, управляющие программы и даже языки программирования. Все это мы обсуждать не будем.

Центральным рассматриваемым здесь вопросом является проблема автоматизации проектирования и в ней — выбор альтернативных вариантов. Ведь ошибка в исходных позициях не может быть затем исправлена ни совершенством графической техники, ни методиками обработки результатов эксперимента, ни станками с программным управлением. Если мы сегодня научимся помогать конструктору, проектировщику или планировщику не ошибаться в выборе основного «базового» варианта будущей конструкции или проекта народнохозяйственного комплекса, то это и будет тем решающим вкладом теории принятия решений в автоматизацию проектирования, который столь необходим в период резкого усложнения различных народнохозяйственных и технических разработок, технологий и т. д. Я уверен, что использование современного арсенала средств обработки информации и методов, созданных в науке, потребует такой же коренной перестройки процессов проектирования и планирования и совершенствования процедур принятия решения, как появление паровоза потребовало в свое время замены грунтовых дорог железными.

Охватить все вопросы, которые связаны с процедурами

принятия решений при создании проектов и технологий в книге любых размеров, вероятно, невозможно. Поэтому автор ставит себе значительно более скромную задачу — написать введение, которое призвано показать читателю, что создание системы программных процедур должно опираться на некоторые общие принципы.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ И НЕФОРМАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Исследование операций. Этот термин родился в послевоенные годы, когда под операцией стали понимать любое целенаправленное действие и возникла потребность объединить единым термином созданные к тому времени приемы анализа различных операций, поскольку подобных задач к этому времени накопилось уже немало. Это были задачи о распределении ресурсов, выборе маршрутов перевозок, оценки эффективности оружия и технических средств, задачи теории массового обслуживания и многие другие, которые все сводились к некоторым специальным задачам оптимизации.

Предполагалось, что цель операции всегда четко задана и может быть сформулирована в следующих терминах:

$$f(x) \Rightarrow \max,$$

где f — некоторая скалярная функция, а x — вектор, описывающий возможности оперирующей стороны. Например, в задачах о перевозках функция f могла означать или степень удовлетворенности потребителей (например, при дефиците продуктов), или стоимость перевозок (тогда вместо максимума следовало бы искать минимум), а компоненты вектора $x = \{x^i\}$ — количество продукта, которое следовало взять из каждого i -го склада.

Однако все эти задачи обладали одной особенностью, которая их качественно отличала от задач, изучавшихся до того времени классическим математическим анализом. Вектор x был не произвольным вектором, а принадлежал некоторому ограниченному замкнутому множеству. Например, количество продукта, которое можно было взять с i -го склада x^i , не должно было быть большим, чем объем продукта x_i на складе, т. е. имели место ограничения типа неравенств:

$$0 \leq x^i \leq x_i.$$

Эти задачи требовали отыскания экстремума функции $f(x)$ на некотором множестве G , которое могло быть и замкнутым. Такой факт будем записывать в следующей форме:

$$f(x) \underset{x \in G}{\Rightarrow} \max. \quad (1)$$

Подобная формулировка отвечала тому естественному условию, что количество ресурса, которое находится в распоряжении оперирующей стороны и которое она может израсходовать для достижения своей цели, всегда ограничено.

Задачи, возникшие при исследовании операций, привели к появлению новых разделов прикладной математики — линейного, нелинейного, динамического, дискретного программирования. Возник новый раздел теорий вероятностей — стохастическое программирование, появилось и многое другое.

Развитие методов решения оптимизационных задач сыграло большую роль в развитии разных дисциплин, и прежде всего экономики. Все основные достижения современной экономико-математической науки так или иначе связаны с использованием методов исследования операций. Многие зарубежные авторы склонны даже считать экономико-математические методы скорее частью исследования операций, нежели разделом экономической науки.

Функция $f(x)$ из (1) носит название функции цели или целевой функции. На первом этапе, этапе становления исследования операций как дисциплины, предполагалось, что функция $f(x)$ задана тем или иным образом извне. Задача ставится кем-то, например оперирующей стороной, в интересах которой она и решается, а исследователь операции должен изучить условия достижения цели, т. е. изучить все ограничения задачи (в нашей терминологии описать множество G) и построить процедуру решения, т. е. отыскания экстремума функции $f(x)$ на множестве G .

Таким образом, уже с самого начала исследование операций представлялось как некоторая синтетическая дисциплина, в которой объединено неформальное начало — содержательное изучение условий задачи и формальное — построение метода решения оптимизационной задачи.

Однако уже очень скоро стало ясно, что подобная «каноническая» трактовка предмета заведомо недостаточна. В самом деле, основные задачи исследования операций всегда многокритериальные, и определение функции цели не может считаться экзогенной процедурой, а должно быть включено в исследование.

Прежде всего заметим, что даже задачу (1) можно рассматривать как частный случай многоэкстремальной задачи. Действительно, условие $x \in G$ — это тоже некоторая цель. Введем новую целевую функцию, например, по следующему правилу:

$$f_1(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in G; \\ 0, & \text{если } x \notin G. \end{cases}$$

Тогда исходную задачу исследования операций мы можем сформулировать в следующей форме: найти такой вектор x , который одновременно доставлял бы максимальное значение обеим функциям: $f_1(x)$ и $f(x)$.

В общем случае многоцелевая задача математического смысла не имеет. В самом деле, обозначим через Ω и Ω_1 множества максимумов функций $f(x)$ и $f_1(x)$. Очевидно, что решение задачи не существует, если множества Ω и Ω_1 не пересекаются. Например, если функции $f(x)$ и $f_1(x)$ унимодальны и точки, где эти функции достигают максимумов, не совпадают, то, очевидно, не существует такого значения x , которое давало бы одновременно экстремальное значение обеим функциям. Если же $\Omega \cap \Omega_1 \neq \emptyset$, то задача сводится к отысканию экстремума на пересечении этих множеств:

$$\bar{\Omega} = \Omega \cap \Omega_1.$$

В задачах, которые положили начало исследованию операций, собственно говоря, так и обстояло дело: разыскивался максимум функции $f(x)$, которая была унимодальной на множестве максимумов функции $f_1(x)$ — множестве Ω_1 .

Но в практических задачах, помимо целевой функции типа $f_1(x)$, описывающей ограничения, возникали дополнительные цели. Например, в той же задаче о перевозках обычно требуется не просто обеспечить потребности, но еще и минимизировать функцию затрат $F(x) \Rightarrow \min$, т. е. типичной является не задача (1), а задача (2):

$$\begin{aligned} f(x) &\Rightarrow \max; \\ -F(x) &\Rightarrow \max. \end{aligned} \tag{2}$$

Эта задача в отличие от задачи (1), как правило, решения уже не имеет. В самом деле, чем больше будут затраты, т. е. чем меньше функция $-F(x)$, тем лучше мы можем удовлетворить потребности. Обе цели оказываются противоречащими друг другу. Заметим, что этот факт нашел свое выражение в распространенной фразе: добиться максимума про-

изводства с минимумом затрат. Она строго научного смысла не имеет, ибо минимум затрат — нуль, а нулевыми затратами произвести какую-либо полезную работу нельзя.

И эта типичная ситуация показывает, что, даже зная цели (желания) оперирующей стороны, исследователь операции еще не может приступить к своему «основному делу»: решению оптимизационной задачи.

Но как сформулировать единую цель, если критериев много:

$$f_1(x) \Rightarrow \max; \quad f_2(x) \Rightarrow \max; \quad \dots; \quad f_n(x) \Rightarrow \max,$$

а ресурс для их достижения находится только в «одних руках»? И хотя математика не может дать однозначного ответа на этот вопрос, она может помочь принять решение и сделать правильный выбор! Об этом ниже.

Вторая трудность, с которой столкнулось исследование операций уже в самой начальной стадии своего развития, — наличие неопределенностей. С одним типом неопределенности мы уже столкнулись — это неопределенность целей (желаний). Например, желание главного конструктора самолетов — добиться того, чтобы его самолет был самым скоростным, самым высотным, самым надежным и к тому же самым дешевым. Но ведь добиться всего этого одновременно невозможно в принципе! Реальная конструкция всегда будет каким-то компромиссом, каким-то сочетанием требуемых качеств. Но каких — конструктор заранее не знает. В этом и состоит одна из трагедий многокритериальности — неопределенность цели.

Другой тип неопределенности мы будем называть неопределенностью природы. Предположим, что мы знаем нашу цель, например, мы хотим так проложить маршрут и распорядиться имеющимся запасом горючего, чтобы наш самолет как можно быстрее долетел из Москвы до Владивостока. Но время полета T будет зависеть не только от нас, но еще и от погоды на трассе, т. е.

$$T = f(x, \alpha),$$

где $\alpha \in G$ — некоторый параметр, который мы заранее не знаем и не можем контролировать, а выбор x — нашего способа действий, который нам обеспечивает минимальное значение T , будет существенно зависеть от α .

Третий тип неопределенности — реальный «противник». Я нарочно взял слово в кавычки. Результат наших действий может зависеть от действий другого лица. И этот

другой не всегда противник — он может быть и нашим другом. Но у него есть какие-то свои цели, которые мы можем и не знать. И он, даже желая нам помочь, может не знать наших целей. И снова значение целевой функции f будет зависеть не только от нашего выбора x , но и от выбора y, z, \dots другим лицом (субъектом):

$$f = f(x, y, z, \dots).$$

Для того чтобы преодолеть эту неопределенность и добраться до математики, мы должны будем вводить какие-либо гипотезы о поведении других субъектов.

Таким образом, исследование операций — наука о принятии решений необходимо должна опираться на неформальный анализ, уметь строить возможные гипотезы, использовать результаты экспертных оценок и т. д.

Возможные типы гипотез. «Исследование операций» по-прежнему начало превращаться в некоторую синтетическую дисциплину, опирающуюся не только на обширный математический аппарат, но и на целый ряд методов преодоления неопределенностей. Покойный Ю. Б. Гермейер — организатор и первый заведующий кафедрой исследования операций в МГУ — ввел даже специальный термин «теория исследования операций» *.

В рамках теории изучались, в частности, различные способы преодоления неопределенностей, необходимые для этого гипотезы и свойства решений, им удовлетворяющие.

Остановимся здесь на некоторых наиболее употребительных способах преодоления неопределенностей.

Начнем сначала с проблемы неопределенности целей, с обсуждения того случая, когда перед исследователем операции стоит задача выбора способа действия (вектора x), обеспечивающего максимальное значение функционалам:

$$f_1(x), f_2(x), \dots, f_N(x).$$

Л и н е й н а я с в е р т к а. Вместо N различных критериев предлагается рассматривать один критерий вида:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N c_i f_i(x), \quad (3)$$

где c_i — некоторые положительные числа, тем или иным

* См.: Ю. Б. Гермейер. Математическая теория исследования операций, М., «Наука», 1971.

образом нормированные; например, если $f_i(x)$ — безразмерны, то $\sum_{i=1}^N c_i = 1$.

Такой способ свертки эквивалентен ранжированию критериев (целевых функций), так как величины c_i показывают, насколько изменяется целевая функция F при изменении критерия с номером i на единицу:

$$c_i = \frac{\partial F}{\partial f_i}.$$

Коэффициенты c_i — результат экспертизы; они отражают представление оперирующей стороны о содержании компромисса, который она вынуждена принять. Значит, содержание компромисса состоит в ранжировании своих целей. Такое ранжирование, разумеется, представляет собой далеко не универсальный способ преодоления неопределенности целей.

Использование контрольных цифр. Очень часто в задачах планирования и проектирования задается некоторая система нормативов: $f_1^*, f_2^*, \dots, f_N^*$. Это значит, например, что параметры будущей конструкции должны быть таковы, что

$$f_i(x) \Rightarrow \max \text{ при условии } f_i(x) \geq f_i^*.$$

В таких случаях целевую функцию удобно представить в форме:

$$F(x) = \min_i \frac{f_i(x)}{f_i^*} \quad (4)$$

и искать вектор x , который обеспечивает максимальное значение $F(x)$. Смысл этого достаточно прост. При данном значении вектора x величина $F(x)$ дает нам значение наихудшего из показателей $f_i(x)$. Значит, условие $F(x) \Rightarrow \max$ означает выбор такой системы конструктивных параметров x , которая максимизирует отношение i -го реально достигнутого значения критерия к его контрольному значению.

Значения f_i^* , если они жестко не заданы, также могут быть определены в результате экспертного опроса.

Критерии в форме (3) и (4) обладают следующим важным достоинством. Предположим, что ограничения, наложенные на выбор компонент вектора x , являются линейными:

$$\sum a_{ij} x^j \leq b_i, \quad (5)$$

так же как и функция $f_i(x) = \sum d_{ij} x^j$.

Тогда очевидно, что задача выбора с использованием критерия (3) сведется к задаче линейного программирования: определить максимум линейной формы:

$$F(x) = \sum_s \sum_i c_i d_{si} x^s \Rightarrow \max$$

при линейных ограничениях (5).

Критерий (4) при этих условиях обладает тем же свойством. Это легко показать, используя новую переменную:

$$V = \min_j \frac{f_j(x)}{f_j^*}.$$

Тогда, очевидно, к ограничениям добавятся еще и такие:

$$f_j(x) \geq V f_j^*. \quad (6)$$

И мы приходим к следующей задаче линейного программирования: определить максимум по x скаляра V , удовлетворяющего ограничениям (5) и (6).

Компромиссы Парето. Сталкиваясь с многокритериальными задачами, естественно испытываешь желание найти способы сведения их к обычным одноэкстремальным задачам. Эти способы, разумеется, должны носить неформальный характер, ибо они не могут быть получены как результат решения какой-либо математической задачи. Мы уже рассмотрели два таких способа, основанных на операции свертывания критериев.

Но к анализу многокритериальных задач можно подойти и с других позиций: можно попытаться сократить множество исходных вариантов, т. е. исключить из неформального анализа те варианты решений, которые заведомо будут плохи. Рассмотрим один из подобных путей, предложенный известным итальянским экономистом Парето в 1904 году.

Предположим, что мы сделали некоторый выбор. Обозначим его через x^* и предположим далее, что существует некоторый другой выбор \hat{x} , такой, что для всех критериев $f_i(x)$ имеют место неравенства:

$$f_i(\hat{x}) \geq f_i(x^*). \quad (7)$$

Очевидно, что выбор \hat{x} предпочтительнее x^* . Поэтому все векторы x^* , удовлетворяющие этому неравенству; следует сразу исключить из рассмотрения. Имеет смысл заниматься сопоставлением, подвергать неформальному анализу только те векторы \hat{x} , для которых не существует \hat{x} , для всех критериев, удовлетворяющих неравенствам [7].

Множество всех таких значений x называют множеством Парето.

Предположим, что цели субъекта определяются двумя однозначными функциями:

$$f_1(x) \Rightarrow \max;$$

$$f_2(x) \Rightarrow \max.$$

Тогда каждому допустимому значению переменной $x \in G$ отвечает одна точка на плоскости (f_1, f_2) (рис. 1), и равенства

$$f_1 = f_1(x); \quad f_2 = f_2(x)$$

определяют параметрическое задание некоторой кривой $abcd$. К множеству Парето можно отнести только участки ab и cd этой кривой. Участок bc , очевидно, не принадлежит к множеству Парето, поскольку вместе с ростом f_1 происходит и рост f_2 . Таким образом, на этом участке изменению переменной x отвечает одновременное увеличение обеих целевых функций, и, следовательно, такие варианты решений должны быть сразу исключены из дальнейшего рассмотрения.

В теории принятия решений существует термин «принцип Парето», заключающийся в том, что выбирать в качестве решения следует только тот вектор x , который принадлежит множеству Парето.

Принцип Парето не выделяет единственного решения, он только сужает множество альтернатив. Окончательный выбор остается за лицом, принимающим решение. Но исследователь, математик, построив множество Парето, конечно, облегчает процедуру выбора решения.

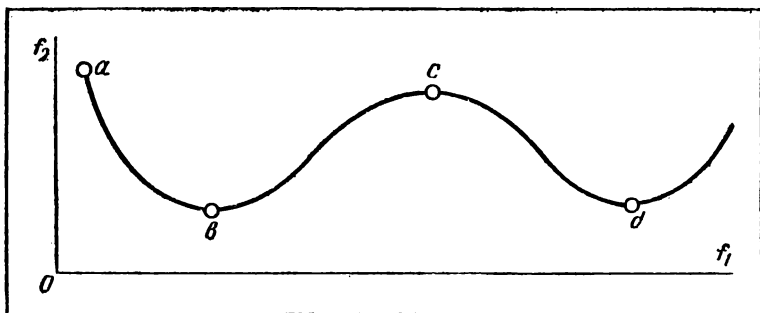


Рис. 1.

Принцип Парето играет очень важную роль в автоматизации проектирования. Предположим, например, что речь идет о проектировании водохозяйственного комплекса. В результате создания этого комплекса появится возможность обеспечить водой несколько крупных промышленных и сельскохозяйственных комплексов и тем самым повысить их эффективность. Но одновременно возникает и целый ряд отрицательных явлений. Большая площадь водохранилищ, которая необходима для регулярной работы гидрокомплекса, приводит к застойным явлениям, большим потерям воды на испарение и т. д. Помимо этого, уменьшение количества воды в речной системе ухудшает условия рыбоводства и судоходства, а строительство промышленных комплексов увеличивает загрязнение и, следовательно, ухудшает качество воды, поступающей на поля, и т. д. Одним словом, ситуация оказывается принципиально многокритериальной, цели проектировщика могут быть выписаны в виде:

$$f_i(x) \Rightarrow \max, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

Проектировщик оказывается перед необходимостью искать компромисс. И одним из путей отыскания этого компромисса будет построение множества Парето, изучение которого дает большую информацию. Лицо, принимающее решение, видит, в частности, сколько «стоит» увеличение одного из показателей, как оно отзывается на остальных показателях, значение которых непременно ухудшается. Это множество оказывается, как правило, весьма сложной природы. Его анализ интуитивным методом вряд ли оказывается возможным.

Но помимо критериев f_i , в распоряжении проектировщика есть обычно еще некоторый общий критерий $F(x)$. Иногда он бывает формализован, записан в явном виде. Например, таким критерием может быть стоимость проекта. В этом случае исследователю операций представляется возможность решить задачу до «конца». Для этого ему достаточно определить вектор x , который дает решение задачи: $F(x) \Rightarrow \max$ при $x \in P(f_1, \dots, f_N) \cap G$, где $P(f_1, \dots, f_N)$ — множество Парето для функционалов f_i , а G — множество допустимых векторов x . Например, в случае водохозяйственного комплекса множество G определяется распределением воды по объектам x^i , при котором ее количество не превосходит притока $Q(t)$.

П р и н ц и п г а р а н т и р о в а н н о г о р е з у л ь т а т а. Рассмотрим природную неопределенность — неопре-

деленность наших знаний. Пусть целевая функция имеет вид: $f(x) = f(x, \alpha)$. Здесь x — в общем случае вектор, выбор которого зависит от нас, причем $x \in G$ (например, если x — ресурс (скаляр), то $x \in [0, c]$, где c — его предельно допустимое значение); α — фактор, который нам неизвестен (погода, рыночные цены и т. д.). В нашем распоряжении есть только одна информация: $\alpha \in G_\alpha$, где G_α — некоторое ограниченное множество.

В этой ситуации следует различать следующие два крайних случая:

а) Выбор x производится многократно, α — случайная величина, закон распределения которой известен. Тогда значение функции также будет некоторой случайной величиной. Здесь исходную задачу $f \Rightarrow \max$ следует заменить некоторой вероятностной. Обозначим через $\bar{\alpha}$ среднее значение случайной величины. Ему будет отвечать некоторая функция $f^* = f(x, \bar{\alpha})$, которую мы можем использовать в качестве нового критерия. Заметим, что подобная замена будет некоторым неформальным актом и f^* в общем случае не равно среднему значению \bar{f} .

В этой ситуации могут быть и другие способы сведения исходной задачи к некоторой вероятностной. Но в любом случае они не будут строгими математическими операциями, а будут опираться на предположение, что выбор параметров, произведенный согласно новому, введенному нами правилу, обеспечивает нашей системе желаемое качество.

б) Выбор x — однократная операция. В этом случае информация о том, что α — случайная величина с известными статистическими характеристиками, практически ничего не может дать, ибо параметр α в нашем однократном опыте может принять любое значение. Это обстоятельство не всегда достаточно отчетливо понимается. Предположения о том, что α равно 0 или 10^{10} в равной степени являются гипотезами, которые остаются на совести исследователя операций. Но вот информация о том, что $\alpha \in G_\alpha$, может служить источником целого ряда важных заключений. Прежде всего она дает возможность получить гарантированную оценку.

Так как для любого x $f(x, \alpha) \geq \min_{\alpha \in G_\alpha} f(x, \alpha)$, то и для любого α :

$$f^* = \max_x \min_{\alpha \in G_\alpha} f(x, \alpha) \leq \max_x f(x, \alpha).$$

Такое f^* называется гарантированной оценкой (гарантирующей стратегией) в том смысле, что, каково бы ни было

α , гарантируется такой выбор $x = x^*$, что при любом α значение целевой функции будет не меньше, чем f^* . Для получения гарантирующей стратегии необходимо решить следующие задачи оптимизации:

1) вычислить $\min_{\alpha \in G_\alpha} f(x, \alpha)$ для любого x ; в результате будут найдены

$$\alpha = \alpha^*(x) \text{ и } \hat{f}(x) = f(x, \alpha^*(x));$$

2) вычислить $\max_x f(x, \alpha^*(x))$; в результате будут определены $x = x^*$ и $f^*(x^*)$.

Гарантированную оценку можно значительно улучшить, если знать заранее, что в момент «действия» или «опыта» будет известна величина параметра α . Определим значение функции $x = \bar{x}(\alpha)$ такое, что для любого α она дает $\max f(x, \alpha) = f(\bar{x}(\alpha), \alpha) = \bar{f}(\alpha)$.

Вычислим затем такое $\alpha = \bar{\alpha}$, которое определяет

$$\min_{\alpha \in G_\alpha} \bar{f}(\alpha) = f(\bar{\alpha}) = \min_{\alpha} \max_x f(x, \alpha).$$

Поскольку $\bar{f}(\bar{\alpha}) \geq f^*(\alpha^*)$, то информация о том, что в момент принятия решения мы будем знать величину неопределенного фактора, например состояния погоды, позволяет получить новую гарантированную оценку, но более «совершенную». Но в этом случае гарантирующей стратегией будет не вектор $x = x^*$, а некоторая функция:

$$x = \bar{x}(\alpha).$$

Неопределенности, связанные с активным партнером. В теории исследования операций особое место занимает изучение ситуаций, в которых участвуют много субъектов (много оперирующих сторон), причем каждый из них стремится достичь своей цели:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) \Rightarrow \max_{x_i}$$

и имеет для этого определенные возможности, которые описываются вектором x_i , $x_i \in G_i$.

Заметим, что формально эта ситуация включает в себя проблему многокритериальности, требующую отыскания вектора x , при котором достигается максимум критериев $f_i(x)$. В самом деле, если мы отождествим цель каждого из субъектов с его критерием $f_i(x_i)$, а в качестве описания множества G_i примем условие

$$x_1 = x_2 = \dots = x_N,$$

то получим частный случай задачи со многими активными партнерами. Но, конечно, общий случай ситуации со многими субъектами гораздо сложнее и требует для своего анализа целого ряда специфических гипотез. Поясним это на примере двух субъектов.

Итак, пусть два субъекта А и Б, располагающие возможностью выбора (векторов) x и y , стремятся к достижению своих целей, которые мы будем записывать в виде:

$$f(x, y) \Rightarrow \max; \quad \varphi(x, y) \Rightarrow \max; \quad x \in X, \quad y \in Y.$$

В частном случае может оказаться, что $f = -\varphi$; такую ситуацию мы будем называть антагонистической. При изучении подобных ситуаций, т. е. определении возможных способов выбора, удобно отождествить исследователя с одним из субъектов. Условимся, например, говорить «мы», когда речь идет о субъекте А. Это тем более имеет смысл делать, поскольку анализ всегда проводится с позиций интересов какого-либо из субъектов.

В связи с тем что исход нашего выбора зависит от выбора субъекта В, мы должны принять ту или иную гипотезу о его поведении, которое, в свою очередь, будет зависеть от характера информированности субъекта В. Здесь возможно несколько гипотез (несколько случаев).

а) Каждый из субъектов ничего не знает о выборе другого. В этом случае единственное, что мы можем сделать, — найти гарантированную оценку

$$f^* = \max_{x \in X} \min_{y \in Y} f(x, y)$$

и вектор x , который ее реализует. Это значит, что, сделав выбор $x = x^*$, мы при любых условиях гарантируем значение нашей целевой функции $f(x, y)$ не меньше, чем $f^*(x^*)$.

б) Известно, что субъект В делает «первый ход». На языке теории игр это означает, что в момент нашего действия (выбора x) мы будем знать выбранное субъектом В значение y . Отсюда следует, что нашу стратегию — выбор x — следует искать в виде функции $x = x(y)$, которую мы можем определить, эффективно решая задачу максимизации:

$$f(x, y) \Rightarrow \max.$$

Гарантированной оценкой для этого случая будет величина

$$\hat{f} = \min_y \max_x f(x, y).$$

в) Мы делаем первый ход — это означает, что субъект В будет знать наш выбор. Какие следствия мы можем получить для себя из этой гипотезы? Начнем рассуждать с позиций интересов субъекта В. Решая за него задачу выбора

$$\varphi(x, y) \Rightarrow \max,$$

мы можем определить функцию $y = y(x)$ — ответ субъекта В на наш выбор. Поскольку теперь наша целевая функция зависит только от x :

$$f(x) = f(x, y(x)),$$

то задача выбора сводится к решению задачи максимизации

$$f(x, y(x)) \Rightarrow \max.$$

г) Предположим, что первый ход делает субъект В, но в отличие от ситуации «б» он может рассуждать более тонко, т. е. способен решать задачу «за нас». В этом случае он находит наш ответ $x(y)$, после чего, повторяя только что приведенные рассуждения, делает свой выбор: $y = y[x(y)]$. Знание этих обстоятельств мы можем использовать для своего выбора. Поскольку в этом случае $f(x, y) = f(x, y[x(y)])$ зависит от функции $x(y)$, а $y = y[x(y)]$ — некоторое число (вектор), то мы, решая задачу оптимизации, делаем свой выбор. Еще более тонкая ситуация возникает, когда мы предполагаем, что субъект В будет знать наш выбор и этот выбор будет иметь характер синтеза, т. е. представлять собой функцию $x(y)$. Тогда наш выбор будет сводиться к задаче

$$f(x(y); y[x(y)]) \Rightarrow \max_{x(y)},$$

в результате решения которой мы найдем функцию $x(y)$. Мы привели целый ряд предположений, носящих характер рефлексий типа «я знаю, что он знает о том, что я знаю, о том, что он знает» и т. д. И выбор в общем случае будет зависеть от той глубины рефлексии, которую мы будем предполагать*.

Итак, для того, чтобы изучить ситуации со многими активными партнерами, необходимы предположения о по-

* В последние годы получен ряд интересных результатов, показывающих, что неограниченное наращивание подобных рефлексий во многих случаях не имеет смысла (см. подробнее в монографии: Ю. Б. Гермейер. Игры с противоположными интересами. М., «Наука», 1975).

ведении этих партнеров, т. е. предположения об их аналитических способностях.

Но существует и другой тип гипотез, с которыми приходится иметь дело. Важную роль играют различные предположения, связанные с устойчивостью решения. Рассмотрим такой пример.

Пусть в результате дискуссий возник компромисс, т. е. множество взаимодействующих субъектов договорились, что субъект 1 должен придать своему ресурсу значение \hat{x}_1 , субъект 2 — \hat{x}_2 и т. д. В результате целевые функции субъектов (например, их доход) будут $\hat{f}_1 = f_1(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N)$, $\hat{f}_2 = f_2(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \dots, \hat{x}_N)$ и т. д.

Но может случиться так, что кто-либо, например субъект i , нарушив договоренность, вместо ресурса \hat{x}_i выделит ресурс x_i^* и при этом окажется, что его доход станет большим, чем тот, который он должен был получить, если бы следовал договоренности, т. е. $f_i(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{i-1}, \hat{x}_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_N) > \hat{f}_i$. Доходы остальных субъектов вследствие такого поведения субъекта i могут оказаться меньшими, чем те, на которые они рассчитывали, т. е. нарушение договоренности окажется выгодным только одному субъекту (или в крайнем случае нескольким).

Ситуации, подобные описанной, когда нарушение условий компромисса приводит к тому, что большинство субъектов теряют значительную часть своих «доходов», являются одной из основных трудностей принятия коллективных решений. Компромисс должен давать определенные гарантии против недобросовестных партнеров, иначе говоря, быть устойчивым.

Одно из условий обеспечения устойчивости было предложено в двадцатых годах английским математиком Нэшем. Он сформулировал его в виде принципа устойчивости: компромисс, т. е. выбор величин $x_i = \hat{x}_i$, называется устойчивым, если отступление от него невыгодно прежде всего партнеру — нарушителю компромисса. Это условие, очевидно, всегда будет выполняться, если

$$\max_{x_i} f_i(\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{i-1}, x_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_N) = \hat{f}_i.$$

Принцип Нэша говорит о том, что компромисс следует искать среди устойчивых решений.

Но принцип Нэша далеко не всегда может быть применен,

В самом деле, ведь выбор величин $\{\hat{x}_1 \dots \hat{x}_N\}$ обязан быть еще и эффективным, т. е. принадлежать множеству Парето: не должно существовать другого выбора, который всем партнерам одновременно позволял бы добиться большего значения целевых функций, нежели то, которое давал бы им компромисс Нэша.

После всего сказанного кажется естественным искать компромисс среди выборов $\{\hat{x}_1 \dots \hat{x}_N\}$, принадлежащих одновременно как множеству Парето, так и множеству Нэша. Но противоречивость всех ситуаций, требующих принятия коллективных решений, состоит в том, что наиболее типичными случаями являются те, когда точки множества Парето не являются устойчивыми, а устойчивые точки эффективными.

Мы дали очень беглый обзор некоторых проблем, которыми занимается классическая теория исследования операций*, основное содержание которой схематично можно представить в следующем виде:

1) анализ неопределенностей с последующим формулированием функции цели;

2) решение оптимизационных задач.

Вторая группа вопросов относится к тем разделам прикладной математики, основным содержанием которых является развитие строгих методов численного решения. Что же касается первой группы вопросов — проблемы неопределенностей, то в ее решении математика играет второстепенную роль, так как самым важным здесь является принятие или непринятие тех или иных гипотез. С их типичными примерами мы уже познакомились в этой главе.

II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИМИТАЦИЯ

О термине «системный анализ». В последнее время в литературе на русском языке очень широко используются три «системных» понятия: «системный анализ», «теория систем» и «системный подход». Между ними часто ставят знак тождества, что приводит к некоторой путанице. Поскольку в дальнейшем мы будем говорить о методах системного ана-

* См. Ю. Б. Гермейер. Математическая теория исследования операций. М., «Наука», 1971.

лиза, то нам сразу нужно четко определить те термины, которые мы предполагаем использовать.

Слово «система» и связанные с ним термины получили особенно в последнее десятилетие очень широкое распространение. Это связано с тем, что на передний план все более и более выступает необходимость изучения сложных комплексов (систем). Такая необходимость определяется резким усложнением создаваемых технических конструкций, устройств, технологий и всех совокупностей хозяйственных связей, с которыми приходится иметь дело экономистам и хозяйственным руководителям.

Потребность изучения биологических объектов и проблем экологии, которые с каждым годом становятся все более и более актуальными, также приводит исследователя к сложнейшим системам.

И вот в ответ на потребности изучения сложных систем возникла дисциплина — «системный анализ», которую естественно считать дальнейшим развитием исследования операций.

В предыдущей главе мы рассмотрели круг вопросов теории исследования операций, связанных с проблемой неопределенности, в частности неопределенности цели, и указали ряд гипотез и приемов, которые помогают нам решить эту проблему и уточнить наши желания. Но того инструмента (инструмента теории исследования операций), о котором мы рассказывали, часто оказывается недостаточно.

Неопределенность цели, с которой мы сталкивались до сих пор, состояла в многокритериальности! Нам было трудно соизмерить и сопоставить между собой различные требования. Но может оказаться так, что мы либо вообще не сможем сколько-нибудь точно поставить цели, либо те цели, которые нам хотелось бы поставить, нереальны. (Примеры подобных ситуаций дает порой экономика.) В этом случае нам на помощь приходит системный анализ.

Допустим, что речь идет о планах перспективного развития Западно-Сибирского топливно-энергетического комплекса. Как определить цели? Конечно, мы всегда можем произнести те или иные слова: топлива побольше, затрат поменьше и т. д. Но для проекта плана необходимы более или менее точные показатели и, естественно, реалистические цели, которые согласуются с потребностями страны и могут быть обеспечены существующими ресурсами. По-

добные проблемы уже не вписываются в стандартную схему исследования операций. Здесь необходимо описать систему моделей, создать тот математический «сервис», который позволит «заглянуть в завтра», увидеть следствия наших решений, оценить наши возможности при различных альтернативах и только на основе такого системного анализа сформулировать цели. Сложность изучаемых и проектируемых систем приводит к необходимости создания специальной, качественно новой техники исследования, именуемой системами имитации — специально организованными системами математических моделей, воспроизводящих в ЭВМ функционирование проектируемого или изучаемого комплекса.

Но исследование динамики процесса, позволяющее увидеть перспективы и наметить цели,— это лишь один из аспектов системного анализа, может быть, и самый важный, но отнюдь не исчерпывающий всего многообразия вопросов, на которые он в состоянии дать ответ.

Один из трудных вопросов, который изучается в рамках системного анализа, относится к проблемам проектирования иерархической организации. Любые более или менее сложные системы всегда организованы по иерархическому принципу, в связи с тем, что централизованные обработка информации и принятие решений часто бывают невозможными из-за большого объема информации, которую следует собирать и перерабатывать, из-за возникающих при этом задержек и искажений и т. д. Если речь идет о проектировании технических систем, то задача исследования систем (задача проектировщика) состоит прежде всего в разработке самой функциональной схемы, которая может быть реализована заведомо не единственным способом, и в определении частных целей.

Значительно сложнее обстоит дело, когда речь идет о народнохозяйственных комплексах, функционирование элементов которых зависит от того, как управляют ими люди. В отличие от машины человек всегда имеет собственные цели и интересы, и проектировщику системы уже недостаточно только формулировать цели для нижних звеньев. Необходимо еще быть уверенным, что эти цели будут достигнуты, т. е. что нижние звенья выполняют требования верхних звеньев. А для этого, в свою очередь, должен быть спроектирован специальный «механизм», который в применении к народнохозяйственным системам часто называют народнохозяйственным механизмом.

Теория иерархических систем, которая занимается некоторыми из аспектов этой проблемы, является одной из важнейших частей системного анализа.

Таким образом, системный анализ — это техническая дисциплина, развивающая методы проектирования сложных технических и народнохозяйственных систем, организационных структур и т. д. Системный анализ как дальнейшее развитие теории исследования операций включает в себя последнюю со всем арсеналом средств, развитых в ее рамках.

Поскольку любой анализ сложных систем невозможен без использования ЭВМ, то когда говорят о методах системного анализа, имеют обычно в виду процедуры, основанные на использовании ЭВМ.

Термин «системный анализ» в известном смысле незаконный. В начале шестидесятых годов в США появился термин «system analysis» для обозначения возникавшей тогда техники анализа сложных систем, развивавшей прежде всего методы исследования операций. Исследователь операций в англоязычной литературе назывался «analyst». Для того чтобы подчеркнуть квалификацию специалиста, занимающегося анализом и проектированием сложных систем, его стали называть термином «system analyst». Таким образом, термин «system analysis» следовало бы перевести как «анализ систем», но его однажды перевели как «системный анализ», так как на английский язык оба эти термина переводятся одинаково — system analysis. В русском же языке термин «системный анализ» несет гораздо большую смысловую нагрузку. Он является синонимом большой самостоятельной дисциплины.

Наряду с термином «системный анализ» большое распространение получил и другой термин «теория систем». Несмотря на широкое использование этого термина, его единое понимание отсутствует. Точно так же не удастся определить достаточно четко и сам термин «система».

Возникновение «теории систем» обычно связывают с именем известного биолога Людвиг фон Бертеланфи, который в пятидесятых годах в Канаде организовал центр системных исследований и опубликовал большое количество работ, в том числе и книг, в которых пытался найти то общее, что присуще любым достаточно сложным организациям материи как биологической, так и общественной природы. Однако задолго до Бертеланфи наш соотечествен-

ник А. А. Богданов начал создавать теорию организации *. В своей работе А. А. Богданов вводит понятие организации как одного из первичных понятий. Материя существует во времени и пространстве. Она всегда имеет ту или иную организацию. В то же время и организацию нельзя мыслить без ее материального носителя.

Основание для построения теории А. А. Богданов видит в том, что, несмотря на фантастическое разнообразие материала, существующего в природе, количество архитектурных или организационных форм относительно невелико. Он демонстрирует это на массе примеров. Мне кажется, что вот эта «богдановская» традиция в теории систем (или, лучше, теории организации) обладает большой эвристической ценностью, во всяком случае в гносеологическом плане. Она является важным звеном в той системе представлений, которая рисует нам единство материального мира. Но, конечно, она лишена какой-либо прикладной, аппаратной основы.

Таким образом, в отличие от системного анализа, дисциплины прикладной, ориентированной на решение конкретных практических задач, теория систем относится скорее к методологии науки.

Как мы уже говорили, существует понятие «системный подход» — еще более расплывчатое и неточное. И тем не менее оно отражает определенные тенденции, которые стали особенно заметны в послевоенные десятилетия.

В развитии науки всегда отчетливо прослеживались две линии — анализ и синтез. Мы всегда видим стремление к анализируванию — изучению конкретных фактов, проникновению в глубь изучаемого факта, вскрытию тонкой структуры явления и т. д. Но рядом точно так же всегда существует стремление создавать синтезирующие теории, позволяющие объединить различные факты, увидеть перспективы развития того или иного процесса, его связи с другими явлениями, учесть их взаимную обусловленность и т. д.

* А. А. Богданов. Теория организации или тектология. М., 1913. Второе издание вышло в Москве в 1923 г., а последнее в 1929 г. также в Москве уже после смерти ее автора, организатора и первого директора Института переливания крови, сейчас носящего его имя. Во многих новейших исследованиях советских и зарубежных авторов отмечается, что некоторые положения тектологии предвосхитили идеи кибернетики. В тектологии отразились и механистические ошибки А. А. Богданова.

При создании синтезирующих теорий происходит иногда и некоторая утеря информативности. Например, теория Птолемея, помимо общей геоцентрической концепции, давала способы расчета положения планет на небесном своде. Теория Коперника содержала гелиоцентрическую концепцию, но на первых порах никакими способами, позволяющими предсказывать положения планет, не располагала. Значит, для практики (например, для практики мореплавания) на первом этапе своего существования она в отличие от теории Птолемея была непригодна.

В разные периоды времени значение таких подходов было различным. В последние десятилетия, когда на человечество обрушилась лавина новых фактов, роль синтезирующих построений стала особенно большой. Потребность не просто изучать явление, факт, но устанавливать его связь с другими фактами и привела к появлению специального термина «системный подход».

Интерес к подобным синтетическим построениям связан с возросшими возможностями переработки информации. По-видимому, исследователь всегда стремился по возможности «системно» подойти к воззрению на тот или иной факт. Но далеко не всегда он мог иметь в своем распоряжении необходимый инструмент. Сейчас в век ЭВМ эти возможности резко возросли. Отсюда как следствие и стремление к изучению явления во всей его полноте, в связи с другими явлениями.

Системный подход непрерывно стимулируется потребностями практики, которая выдвигает все более и более сложные проекты, требующие анализа междисциплинарных проблем.

В этой брошюре мы будем говорить только о системном анализе, его методах и сосредоточивать внимание на самом существенном его отличии от других дисциплин — необходимости объединения формальных и неформальных методов анализа.

Модели и моделирование. Методы системного анализа * опираются на описание тех или иных фактов, явлений, процессов. Наше знание всегда относительно, поэтому любое описание на любом языке также отображает лишь некоторые стороны явлений и никогда не является абсолютно полным. Если пользоваться языком философии, то можно

* Так же как и методы исследования операций.

сказать, что описание, отражая наши знания, всегда является относительным.

В настоящее время очень широкое распространение получило слово «модель». Понятие «модель» сейчас допускает много различных трактовок, существует классификация моделей и т. д. Подробный анализ этого понятия лежит за рамками данной работы. Употребляя слова «модель», «модельное описание», мы будем иметь в виду некоторое описание, отражающее именно те особенности изучаемого процесса, которые и интересуют исследователя. Точность, качество такого описания определяются прежде всего соответствием модели тем требованиям, которые предъявляются к исследованию, соответствием получаемых с помощью модели результатов наблюдаемому течению процесса.

Если при описании моделей используется язык математики, то имеются в виду математические модели, речь о которых и пойдет дальше.

Изучение математической модели всегда связано с некоторой «алгеброй» — правилами действия над изучаемыми объектами, которые позволяют устанавливать связи между причинами и следствиями. Когда подобная алгебра оказывается достаточно развитой, мы говорим, что в рамках данной модели возникла теория. Иногда говорят о детальной разработке теории.

Построение математических моделей является основой всего системного анализа. Это центральный этап исследования или проектирования любой системы. От качества модели зависит судьба всего последующего анализа.

Построение моделей всегда процедура неформальная и, конечно, очень сильно зависит от исследователя, его опыта, таланта. Оно всегда опирается на определенный опытный материал, в связи с чем мы говорим, что процесс моделирования имеет феноменологическую основу. Модель должна достаточно правильно отражать явления, однако одного этого еще мало. Она должна быть удобной для использования. Поэтому степень детализации модели, форма ее представления и т. д. определяются целями исследования и непосредственно зависят от исследователя. Работая с одним и тем же опытным материалом, разные исследователи могут представлять его совсем по-разному.

Но при всем том различии существуют общие принципы моделирования, игнорирование которых недопустимо. Останемся на этом подробнее.

Основная задача научного анализа — выделить реальные движения* из множества мысленно допустимых, сформировать принципы их отбора. Проблема математического моделирования состоит в описании этих принципов отбора в терминах и тех переменных, которые согласно взглядам исследователя наиболее полно характеризуют изучаемый предмет. Принципы отбора сужают множество допустимых движений, отбрасывая те, которые не могут быть реализованы. Чем более совершенна модель, тем уже становится множество реальных движений, тем точнее оказывается наш прогноз. В различных областях знания принципы отбора движений разные.

Современная наука рассматривает три уровня организации материи: неживая материя, живая материя и самая высокая организация материи — мыслящая, познающая себя материя — общество. Такое деление оправдано качественно различными принципами отбора реальных движений, не сводимыми к принципам нижних уровней организации.

На самом нижнем уровне — уровне неживой материи — основными принципами отбора являются законы сохранения: вещества, импульса, энергии и т. д. Любое моделирование должно начинаться с выбора исследователем основных (или, как говорят, фазовых) переменных, с помощью которых он записывает законы сохранения.

Но законы сохранения не выделяют единственного движения и не исчерпывают всех принципов отбора. Необходимо учитывать второй закон термодинамики, принципы минимума диссипации энергии, устойчивости. Очень важны всякого рода условия (ограничения): граничные, начальные и т. д.

На уровне живой материи все принципы отбора движений, справедливые в неживой материи, сохраняют свою силу*. Поэтому и здесь процесс моделирования начи-

* Здесь и далее движение употребляется в широком смысле — изменение вообще, всякое взаимодействие материальных объектов.

* Тот факт, что законы, справедливые для неживой материи, сохраняют свою силу и для живой материи, долгое время был предметом дискуссий. Особенно много трудностей вызывал второй закон термодинамики. Этот вопрос был решен в тридцатых годах Л. фон Бертеланфи, который, по-видимому, первым показал, что живые существа являются открытыми системами. Это означает, что они не могут существовать без обмена веществом и энергией с окружающей средой (этим-то и объясняются наблюдаемые у них уменьшения энтропии).

нается с записи законов сохранения. Однако основные переменные оказываются уже иными.

Пусть, например, речь идет о какой-либо биологической макросистеме. Основное содержание происходящих в ней процессов — существование сообществ биологических видов. Впервые динамику подобных систем начал изучать знаменитый итальянский математик Вито Вольтерра. Наиболее характерными для таких систем являются процессы потребления пищи. Значит, законы сохранения вещества и энергии должны быть выражены в терминах трофических связей — кто кого ест и в каком количестве. Именно вывод этих соотношений и их исследование составляют содержание известной книги Вольтерра «Математическая теория борьбы за существование».

Но тех принципов отбора, реальных движений, которые свойственны неживой природе, недостаточно, чтобы объяснить содержание процессов, происходящих в живом мире. Живой материи свойственны целесообразные действия, поэтому объяснить наблюдаемое в живом мире без использования понятий обратной связи и информации оказывается невозможным.

Живой организм стремится сохранить свою стабильность — гомеостазис. Это означает, что при различных внешних условиях он должен вести себя так, чтобы его состояние не вышло из той области параметров, которые обеспечивают возможность продолжения существования организма. Любой живой организм обладает рецепторами (датчиками), позволяющими ему оценить свое положение по отношению к границе гомеостаза (вектор x) и способностью к определенным действиям (вектор u). Таким образом, получая информацию (сигнал) об окружающем его мире, он формирует свои действия в зависимости от характера этой информации. Последнее означает, что действия живого организма, т. е. реальные движения, выбираются вполне определенным образом — с помощью обратной связи

$$u = f(x) \quad (1)$$

организм стремится уйти от своей гомеостатической границы.

Стремление сохранить свой гомеостазис порождает вполне определенные механизмы отбора реальных движений (поведения), не выводимые из принципов, определяющих течение процессов в неживой природе.

Подчеркнем еще раз, что связи вида (1) называются обратными связями, и они не могут быть выведены из общих законов физики. Это обстоятельство не всегда правильно понимается, и термин «обратная связь» в системном анализе иногда используют также для тех связей, которые могут быть выведены, например, из законов физики. Здесь и далее когда мы говорим об обратных связях, то мы имеем в виду только те связи, которые носят целесообразный или целенаправленный характер.

Биологические системы относятся к классу управляемых систем рефлексного типа. Управляемых — потому что они содержат свободные функции, находящиеся в распоряжении этих систем, и используются ими для достижения своих целей, а рефлексными — в силу рефлексности функций поведения. Термин «рефлексность» подчеркивает простоту зависимости управляющей функции от информации, или, как иногда говорят, характера рефлекса от возбуждения.

При описании функционирования биологических форм организации материи большую роль играет понятие «организм». Организмом мы называем любую систему, обладающую собственными целями и способностью (ресурсом) для их достижения, т. е. целенаправленными действиями. Именно организм индуцирует петли обратных связей.

Отдельный индивид является организмом. Это очевидно. Определенные организмические особенности проявляют, например, и группы животных. Оказывается, что и популяцию в известных условиях можно рассматривать как организм *. Любая биологическая макросистема всегда является иерархической системой. При анализе легко обнаруживается, что цели более высокого иерархического уровня, как правило, не тождественны целям нижнего уровня. Например, интересы стада в целом (т. е. гомеостазис) не тождественны стремлению сохранить гомеостазис отдельного животного. Более высокие иерархические уровни уже нельзя считать организмами. Например, биогеоценоз (экосистема) не является организмом, хотя и можно говорить о гомеостазисе биогеоценоза. Однако он, по-видимому, не обладает необходимой потенцией для организации верхней петли обратной связи, т. е. целесообразного использования ресурсов для сохранения гомео-

* См. подробнее: К. П. Д а н и л о в и С. С. Ш в а р ц. О биологических макросистемах. — В сб.: «Наука и человечество, 1975». М., «Знание», 1975.

стазиса биогеоценоза. Но это вовсе не означает, что описать динамику экосистемы можно без использования понятия обратной связи, ибо экосистема состоит из большого количества организмов.

Тот факт, что описать функционирование любой живой организации без использования понятия «обратная связь» нельзя, известен достаточно давно, по крайней мере задолго до того, как появился сам термин «обратная связь». Во всяком случае в 1911 году его уже знал А. А. Богданов. Принцип обратной связи в современных терминах был сформулирован в 1931 году создателем биокибернетики П. К. Анохиным.

На общественном уровне организации материи появляется совершенно новое явление — трудовая деятельность. Именно поэтому для описания моделей в этой области мы должны пользоваться терминами трудовой деятельности людей, экономическими терминами. В качестве примера рассмотрим известные балансовые соотношения.

Обозначим через x — вектор производимой продукции. Например, x^1 — это количество выплавленной стали, x^2 — цветных металлов, x^3 — металлорежущих станков и т. д., через $A = \| a_{ij} \|$ — матрицу прямых затрат, т. е. величина a_{ij} определяет количество продукции вида i , необходимого для производства единицы продукции вида j . Тогда очевидно следующее балансовое соотношение:

$$x^i = \sum_j a_{ij} x^j + y^i, \text{ или иначе: } X = Ax + y,$$

где вектор $y = \{y^1, \dots, y^n\}$ носит название вектора конечного продукта. Он может быть использован на инвестиции, потребление, отправлен на склад и т. д.

Но если, описывая процессы, протекающие на биологическом уровне организации, мы говорим о целесообразных действиях, то очевидно, что при описании процессов, протекающих в человеческом обществе, следует говорить о действиях целенаправленных. Здесь мы также говорим об обратных связях, об информационных процессах и т. д. Но все это оказывается неизмеримо более сложным.

Я уже отметил роль понятия организма и то, что организмом является не только каждое живое существо, но при известных условиях и группа живых существ и даже популяция в целом. Но этими макросистемами и исчерпывается организмичность биологического уровня организации. Иное дело человеческое общество. Здесь практически любая

группа людей, любой человеческий коллектив имеют свои цели и средства их достижения. (Особенное значение приобретают общности, связанные с производственной деятельностью людей.) Интересы различных групп могут оказаться сильно отличающимися друг от друга. В предельном случае — в случае классов — эти интересы часто носят антагонистический характер. Для того чтобы описать более или менее адекватно реальности, любой процесс, происходящий в обществе, мы необходимо должны уметь описывать сложнейшую гамму общественных интересов и противоречий. Классическая политэкономия дает блестящий пример такого объединения чисто экономических и социальных начал, без которого понять суть общественных процессов и построить модель, обладающую хорошими прогностическими возможностями, видимо, нельзя.

Ясно, что интересы различных групп связаны с их гомеостазисом. И поэтому здесь также уместно говорить о гомеостатических общностях. Но связи условий гомеостатической стабильности, интересов, которые непосредственно влияют на характер решений, применяемых субъектами (мы отождествляем понятие организма и субъекта), и сами действия, предпринимаемые для достижения этих целей, как правило, весьма опосредованны. Ни о какой рефлексности здесь не может быть и речи. Человек обладает способностью анализировать происходящие процессы, предвидеть исходы своих действий, строить гипотезы о поведении других субъектов, предугадывать их действия и т. д. и т. п. Поэтому обратные связи, которые возникают в человеческом обществе, не могут быть реализованы с помощью простейших функций поведения рефлексного типа. Математическое описание этой нерефлексности — труднейшая проблема. Очень часто (скорее, как правило) мы не в состоянии формализовать эти процессы и должны использовать для их описания параметризацию в форме функций поведения, полученную на основе экспертных оценок.

Подводя итог сказанному, рассмотрим сложившуюся в настоящее время некоторую условную классификацию математических моделей, по характеру и способу использования произвольных функций и параметров, которые они содержат.

Модели без управления. Они описывают динамические процессы (с помощью, например, дифференциальных или разностных уравнений), которые не содержат свободных параметров или функций. К их числу относят

ся большинство чисто прогностических моделей, когда заданное начальное состояние определяет траекторию процесса. Модели такого рода могут быть и стохастическими, например, они могут содержать случайные величины и функции:

$$\dot{x} = f(x, t, \xi),$$

где ξ — некоторый случайный вектор с известным законом распределения вероятностей. В этом случае нас будут интересовать не отдельные траектории, а их статистические свойства, например среднее значение.

Модели, которые могут быть использованы для оптимизации наших действий. Рассмотрим динамический процесс, модель которого описывается некоторым уравнением вида:

$$\dot{x} = f(x, t, u), \quad (2)$$

где выбор функции $u(t, x)$ находится в распоряжении субъекта. Вектор-функция $u(t, x)$ называется управлением. Управление выбирается из условия достижения некоторой цели. Весьма распространенный класс задач, описываемых данной моделью, можно сформулировать следующим образом: за время T перевести систему из состояния

$$x(0) = x_0 \quad (3)$$

в состояние

$$x(T) = x_T, \quad (4)$$

так, чтобы «затраты» были минимальными, т. е.:

$$\int_0^T F(x, u, \xi) d\xi \Rightarrow \min, \quad (5)$$

здесь $F(x, u, \xi)$ — целевая функция.

Ограничения (3) и (4) и целевой функционал (5) мы не включаем в понятие модели. Для одной и той же модели (2) могут ставиться разные задачи.

Модели, которые могут использоваться для анализа конфликтных ситуаций. Предположим, что динамический процесс определяется действиями нескольких субъектов, в распоряжении которых имеются управления: u, v, w, \dots . Тогда

$$\dot{x} = f(x, t, u, v, w, \dots).$$

Но управления будут выбираться из условий

$$\int_0^T F_1(x, u, v, w, \dots, t) \Rightarrow \min, \int_0^T F_2(x, u, v, w, \dots, t) \times \\ \times dt \Rightarrow \min \text{ и т. д.}$$

каждое из которых отражает вполне определенные интересы того или другого субъекта.

Модели описанных типов изучаются в теории управления и теории исследования операций. Но оказывается, что подобного типа моделями не охватывается большое количество ситуаций, как раз тех, необходимость изучения которых и привела к появлению предмета, именуемого системным анализом.

Имитационные системы. Рассмотрим теперь такую задачу. Пусть мы изучаем некоторый неуправляемый динамический процесс, зависящий от случайного вектора ξ с законом распределения вероятностей $F(\xi)$:

$$\dot{x} = f(x, t, \xi). \quad (1)$$

Уравнение (1) определяет некоторое множество траекторий. Будем считать для упрощения, что начальное состояние фиксировано:

$$x(0) = x_0. \quad (2)$$

Как определить среднее значение компонент вектора $x(T)$ в момент $t = T$? Для этого можно, например, использовать машинный датчик случайных чисел, имеющих закон распределения вероятностей $F(\xi)$. Он будет выдавать значения $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$. Подставляя эти значения в уравнение (1), мы получим систему уравнений:

$$\dot{x}_1 = f(x_1, t_1, \xi_1); \dot{x}_2 = f(x_2, t_2, \xi_2) \text{ и т. д.}$$

Решая эти уравнения при условии (2), мы найдем совокупность траекторий $x = x_1(t)$; $x = x_2(t)$ и т. д., после чего интересующая нас величина может быть определена усреднением:

$$x(T) = \frac{1}{N} \sum x_n(t),$$

где N — число испытаний за время T .

Этот прием машинного эксперимента (моделирования) получил в свое время название имитации. По-английски модели такого типа называются «simulation model», что на русский язык было переведено как «имитационная модель».

Такой перевод не совсем удачен, ибо по-русски «имитация» и «моделирование» практически синонимы.

Но главное было, конечно, не в словах — этой процедуре можно было придумать и более точное название; важно то, что она содержала качественно новый способ использования ЭВМ.

Электронная вычислительная машина превращалась в экспериментальную установку. Это был новый этап в использовании вычислительной техники.

Идеи имитации начинают постепенно завоевывать новые и новые позиции. Очень интересная работа по имитации исторического процесса была проделана совместно специалистами ВЦ АН СССР и Института истории АН СССР. Авторы этой работы подвергли анализу один из интереснейших периодов истории Древней Греции — Пелопоннесскую войну. Использование математических моделей и эксперименты с ними имели не только методическое значение, удалось установить целый ряд новых фактов, представлявших интерес для специалистов-историков*.

Имитационный эксперимент для анализа того или иного явления или процесса — это, по существу, хорошо известный «вариантный метод». Задавая неизвестным величинам или функциям те или иные значения, мы с помощью модели определяем интересующие нас характеристики. Сопоставляя их с наблюдениями, уже имеющейся информацией и, наконец, просто руководствуясь здравым смыслом (и интуицией), мы изменяем их значения и ставим новый эксперимент. Благодаря ЭВМ использование вариантных расчетов делается эффективным средством исследования.

Любое исследование — это в конечном счете диалог. Исследователь задает природе вопрос. Для этого он ставит эксперимент. После анализа результатов он задает другой вопрос, для чего видоизменяет эксперимент, и т. д. Вариантные расчеты и машинный эксперимент выполняют эту же роль.

То главное, что диалог человек-ЭВМ на основе математических моделей, имитирующих реальность, представляет собой качественно новый инструмент исследований и проектирования и что перспективы его использования очень широки и интересны, было понято еще в первой половине шестидесятых годов.

* См.: В. А. Устинов и др. Опыт имитационного моделирования историко-социального процесса. — «Вопросы истории», 1976, № 11.

Примерно в те же годы (начало 60-х годов) автором данной работы была предложена и реализована на ЭВМ БЭСМ-2 идея использования диалога человек-ЭВМ для отыскания экстремума сложных функций. Несмотря на большое развитие, которое получили методы оптимизации, отыскание экстремумов функций, топография которых имеет «овражную структуру», до сих пор представляет проблему для вычислительной математики. Употребляя этот термин, мы имеем в виду, что поверхности постоянного уровня $f(x) = \text{const}$ устроены так, что в каждой точке $x = \bar{x}$ производные $\partial f / \partial x^i$ очень сильно различаются друг от друга по величине.

Тем не менее настоящая работа с широким использованием идей имитации началась совсем недавно. И причина этого в следующем.

Для того чтобы диалог человек-ЭВМ был эффективен, необходимо по меньшей мере выполнение двух условий.

а) Чтобы процедура постановки вопроса и анализа ответа была бы относительно простой.

б) Чтобы время между моментами, когда вопрос задан и получен ответ, также было небольшим.

Другими словами, чтобы этот диалог не был невероятно длительным и трудоемким.

До поры до времени во всяком случае первое из этих условий реализовать было нельзя из-за конструктивных особенностей ЭВМ первых поколений. Процедура задавания вопроса машине (составление программ, ввод информации) была весьма трудоемка. Еще более трудоемкой была процедура расшифровки получаемого ответа. Ответом был, как правило, рулон с многими тысячами цифр. Надо было в них разобраться, построить графики, проанализировать. На все это уходило значительно больше времени, чем на непосредственный счет. Миллионное быстроедействие ЭВМ не снимало месяцев кропотливого и квалифицированного труда. Вот почему на первых порах идеи имитации использовались лишь эпизодически.

Ситуация качественно изменилась после появления ЭВМ третьего поколения, обладающих не только большим быстроедействием и памятью, но и терминальными устройствами, позволяющими представлять информацию в графическом виде (графические дисплеи, чертежные автоматы, графопостроители и т. д.). Кроме того, благодаря системе разделения времени появилась возможность ввода информации непосредственно с пульта терминала,

Реализация этих новых возможностей потребовала пересмотра установившихся взглядов на характер математического обеспечения. Оказалось, что для эффективного использования идеи имитации сложных процессов системы моделей должны быть специальным образом организованы, т. е. создана специальная управляющая программа (ее теперь иногда называют внешней операционной системой) и многое другое, о чем раньше и не задумывались. По-новому стала выглядеть и проблема применяемых языков. В самом деле, имитация дает возможность использовать опыт специалиста, который, как правило, не является математиком. Это может быть конструктор самолета, биолог, экономист... И естественно желание дать этому специалисту возможность самому без посредника (математика) задавать ЭВМ вопросы, одним словом, вести диалог. Но для этого язык общения с ЭВМ должен быть достаточно простым и приспособленным к данному конкретному исследованию.

Так постепенно возникло представление об имитационной системе как о специальным образом организованной совокупности моделей, управляющей программе, необходимой для осуществления диалога, разнообразного математического обеспечения и процедур использования всей этой системы. Последнее очень важно. Ведь имитационная система позволяет реализовать синтез формальных и неформальных методов исследования. Система моделей и математическое обеспечение несут на себе всю нагрузку ручных расчетов, а все управление исследованием остается за человеком. Поэтому исследователю, конструктору очень важно иметь достаточно канонизированную систему процедур, своеобразный алгоритм, который помогает ему найти наиболее простой путь к достижению намеченной цели. Если речь идет об использовании методов моделирования проектирования, например, самолета, то эта система процедур, о которой мы сейчас говорили, будет той новой технологией проектирования самолета, которая основывается на применении современных ЭВМ. Эта система процедур должна быть новым «руководством для конструкторов». Естественно, что такая новая технология проектирования будет зависеть как от возможностей ЭВМ, так и от совершенства математического обеспечения. По мере развития того и другого и квалификации конструкторов технология проектирования будет видоизменяться.

Имитационные системы все в большей степени изменяют традиционное представление об использовании ЭВМ, со-

держании и смысле прикладной математики. Они становятся основным инструментом современного системного анализа.

III. ЭКСПЕРТИЗЫ И ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ

Простейшие экспертизы. Как уже не раз говорилось в предыдущих главах, методы системного анализа широко используют различные неформальные процедуры принятия решений и информационные массивы, полученные с помощью интуиции, опыта и знаний исследователей, конструкторов и других лиц, которых мы условимся в дальнейшем называть экспертами. Если угодно, эксперт играет роль некоторого прибора, который либо совершает предпочтительный выбор, либо устанавливает значения коэффициентов, либо связывает логической нитью причину и следствие и т. д. Таким образом, обращение к эксперту тоже некоторый своеобразный эксперимент, и кажется естественным стремление уточнить его, повторить, обратиться с одним и тем же вопросом к различным экспертам, использовать не только индивидуальный, но и коллективный опыт.

Примерами традиционных процедур, использующих коллективный опыт, являются различные экспертизы, консилиумы, совещания и т. д. В зависимости от характера ситуаций эти процедуры могут сильно отличаться друг от друга. В одних случаях основой подобных процедур может служить дискуссия, в других она категорически не допускается. Например, во время медицинского консилиума очень важно обсудить все доводы, не упустить деталей, взвесить все за и против и т. д. Поэтому процесс диагностирования болезни — это прежде всего процесс развития дискуссии. Другой пример «консилиума» описал Л. Н. Толстой в «Войне и мире» — совет в Филях. Каждый из генералов, приглашенных к Кутузову, высказал свою точку зрения, предложил свой вариант решения. Главнокомандующий выслушал все мнения и сказал: «Я приказываю...». Решение было принято «единогласно» — мнение Кутузова не обсуждалось.

Порядок проведения подобных экспертиз и совещаний очень часто регламентируется традицией (т. е. в конечном счете снова опытом) и во многих отношениях представляет

собой искусство. Однако постепенно и в эту область начинают проникать разнообразные математические методы обработки информации.

Вероятно, один из первых примеров применения «математических методов» в экспертизах дали виноделы. С незапамятных времен существует институт дегустаторов. Их задача оценить качество вина (обычно в баллах), ранжировать по качеству различные вина и т. д. Простейший способ обработки информации, который осуществляет группа дегустаторов, — это расчет средней оценки. Дальнейшее усложнение используемых процедур связано с введением «веса» отдельных экспертов.

Это уже существенное усложнение традиционной процедуры. В самом деле «вес» эксперта может определяться не только опытом, но и результатами его деятельности. Например, «вес» эксперта (причем материальное поощрение эксперта зависит от его веса) считается тем меньшим, чем больше его мнение отклоняется от среднего значения оценки. Благодаря такому усложнению в процедуры построения экспертных оценок вносится элемент обучения. Процесс функционирования коллектива экспертов превращается в некоторый динамический процесс с обратной связью, поскольку материальное благополучие каждого из экспертов (т. е. его «вес») ставится в соответствие с результатом профессиональной деятельности.

В последнее время делаются попытки дальнейшего усложнения подобных процедур. Они связаны со стремлением учесть рыночный спрос и представляют собой элементы адаптации «коллективного вкуса» дегустаторов к меняющейся ситуации.

Пример с дегустаторами является типичным примером простых экспертиз, широко используемых для решения относительно несложных вопросов.

Субъективные вероятности и прогнозирование. Задача прогнозирования ситуаций (научных, технических, политических и т. д.) на основе экспертных оценок требует уже значительно более сложных процедур, поскольку при этом эксперт не в состоянии дать достаточно определенного ответа на прямо поставленный вопрос; в такой постановке он оказывается очень часто вне компетенции эксперта.

Прогноз события A заключается в ответе на вопрос: «Произойдет это событие за время $t \leq T$ или нет?» И обычно эксперт не может дать четкого ответа. Он будет говорить о «более или менее вероятном» свершении события или го-

ворить о шансах и т. д. Поэтому вопрос эксперту обычно задается в вероятностных терминах: «Какова, по мнению эксперта, вероятность $P(T)$ того, что событие A произойдет за время $t \leq T$?»

Подобную оценку мы будем называть интуитивной вероятностью. Заметим сразу, что к математическому понятию «вероятность» эта оценка имеет весьма условное отношение, поскольку речь идет об одном единственном событии. Это просто своеобразная форма нечеткого представления экспертной информации. Но она, как это мы увидим ниже, весьма удобна для решения практических задач.

Вторая трудность связана с тем, что прогнозируемые события достаточно сложны и компетенции эксперта недостаточно для того, чтобы дать четкий ответ. В этом случае событие должно быть расчленено, построено, как говорят, дерево целей, дерево элементарных событий, которые уже будут допускать экспертные оценки описанного выше типа.

Предположим, что речь идет о прогнозе такого события, как высадка людей на Марсе в 2000 году. Это событие (S) мы условимся называть заключительным. Каждый член коллектива экспертов должен прежде всего перечислить события S_1, S_2, \dots, S_k , от выполнения которых зависит совершение или несвершение события S . В нашем примере событие S_1 может быть созданием двигателя, обладающего требуемыми характеристиками, событие S_2 — созданием системы необходимого жизнеобеспечения, S_3 — существованием околоземной станции для сборки конструкций и т. д. Определим еще событие S' :

$$S' = f(S_1, S_2, \dots, S_k),$$

где f — некоторая логическая функция своих переменных. В простейшем случае f образована с помощью одних только операций конъюнкций, т. е. событие S' состоит в одновременном появлении событий S_1, S_2, \dots, S_k . Но, вообще говоря, функция f может иметь и более сложную структуру. Если, например, сборку корабля можно осуществить не только на околоземной станции, то вместо операции «и», т. е. S_i и S_{i+1} , может содержаться операция «или».

В. М. Глушковым для подобных ситуаций был предложен вариант анализа (см. «Кибернетика», 1969, № 2), согласно которому задача эксперта состоит в том, чтобы оценить условную вероятность $P'(t)$ наступления события S за время, не превосходящее t , при условии, что функция f

принимает значение, равное единице, т. е. что событие S' состоялось.

Предположим, что эксперты могут назначить безусловные вероятности $P_i(t)$ наступления событий S_1, S_2, \dots, S_k в течение времени $t \leq \tau$. Тогда на этом процедура экспертизы заканчивается, и мы сможем перейти к обработке ее результатов. Покажем, как это делается для простейшего случая функции f . Поскольку событие S' состоит в одновременном совершении событий S_i , то безусловная вероятность $P_f(\tau)$, что оно наступит за время $t \leq \tau$ будет:

$$P_f(\tau) = P_1(\tau) \cdot P_2(\tau) \dots P_k(\tau).$$

Основная задача экспертов, как мы уже сказали, состоит в том, чтобы дать условную вероятность появления события S в течение времени T после наступления события S' . Осредняя (с учетом веса экспертов или без этого) оценки экспертов, мы получим эту функцию. Обозначим ее через $Q(t)$. Теперь уже совсем просто подсчитать безусловную вероятность наступления события S за время $t \leq t^*$:

$$P(t) = \int_0^{t^*} Q(t - \xi) dP_f(\xi). \quad (1)$$

Если теперь для события S_i эксперты не могут указать безусловных вероятностей $P_i(t)$, т. е. событие S_i для этого чересчур сложно, то необходимо перейти к следующему шагу.

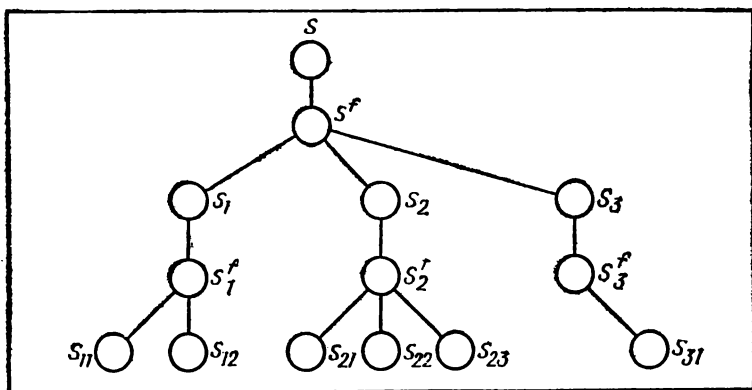


Рис. 2.

Он состоит в том, чтобы для этого события S_i указать события $\{S_{ij}\}$, от наступления которых зависит появление события S_i ; затем ввести событие S'_i , состоящее в наступлении событий S_{ij} . Если эксперты способны оценить безусловные вероятности $P_i(T)$ наступления событий S_i за время $t \leq \tau$ и условную вероятность $Q_i(T)$ свершения события S_i за время T после наступления события S'_i , то по формуле (1) мы подсчитаем безусловные вероятности события S_i и т. д.

Если эксперты не могут оценить вероятностей $P_{ij}(\tau)$, то продолжаем процесс членения. В результате мы получаем некоторое дерево событий (рис. 2). Однажды мы дойдем до такого слоя, в котором будут уже достаточно простые события, доступные для экспертных оценок.

Подобный способ рассуждений давно утвердился в системном анализе. Пример вероятностных оценок — одна из многих иллюстраций той технологии обработки экспертных данных, которая известна как использование дерева целей. Центральный момент всей описанной схемы — это принцип членения большой проблемы на отдельные частные. Что же касается самих оценок, то это могут быть и не только вероятности, это могут быть стоимости, надежности и т. д.

Метод решающих матриц. Итак, успех сложной экспертизы определяется прежде всего тем, как мы сможем разложить сложную проблему на ряд простых. Здесь нет единых рецептов. Метод дерева целей, который был изложен в предыдущем параграфе, это лишь один из многих приемов декомпозиции. Другой способ был предложен Г. С. Поспеловым. Рассмотрим его на примере задачи распределения ассигнований на фундаментальные исследования.

Эта задача трудна по существу, так как из непосредственного опроса исследователей, занимающихся данной проблемой, очень трудно извлечь какую-либо информацию. Лицу, планирующему бюджет, приходится преодолевать противоречие между естественными научными интересами ученого, которому его предмет исследования представляется весьма важным, и интересами общества, которое может выделить на развитие науки лишь вполне ограниченные средства. Интересы общества должны быть представлены в форме некоторой программы, некоторого перечня целей, который и является отправной точкой всей работы. Эти цели могут быть самого разного содержания. Некоторые из них будут иметь чисто научный характер. Например, к 2000 году должна быть произведена высадка на Марс и в

Тускарорской впадине должна быть создана подводная лаборатория. Другие цели могут носить экономический характер, например, создание термоядерных электростанций или полная механизация тех или иных технологических процессов. Третьи — оборонный характер, допустим, создание надежной системы ПРО и т. д.

Мы оставляем в стороне процесс выработки самой программы. По существу, это тоже некоторая процедура, которая определяется направлением развития научного потенциала страны. Перечень работ мы будем считать заданным. Обозначим его через α ; α — это вектор с компонентами α^i ($i = 1, 2, \dots, n_\alpha$).

Процедура построения плана распределения ассигнований предусматривает, что все компоненты вектора α взвешены, т. е. значениям этих компонент приписаны определенные положительные значения. Их удобно тем или иным способом нормировать.

Дальнейшую процедуру привяжем к тому разделению исследовательских работ, которое существует в нашей стране. Традиционным является разделение на опытно-конструкторские разработки, прикладные и фундаментальные исследования. Поэтому следующий этап состоит в определении перечня опытно-конструкторских разработок. Группа экспертов называет некоторый перечень β (вектор с компонентами β^i) опытно-конструкторских разработок, призванных обеспечить достижение целей. Однако теперь вряд ли возможно требовать от экспертов задания весов компонент вектора β . В самом деле, из каких соображений можно сопоставить значение разработки двигательной установки для космического корабля с созданием робота для механизации ручной работы?

И вот Г. С. Поспеловым для определения этих весов предложена следующая процедура. Опытно-конструкторские разработки, как правило, служат сразу нескольким научным целям. Поэтому перед экспертом ставится относительно простая задача построения матрицы $A^\beta = \|a_{ij}^\beta\|$ значимости опытно-конструкторских работ. Элемент a_{ij}^β — это положительное число, показывающее относительное значение конструкторской разработки номера i для целей номера j . Эти величины определенным образом нормируются. Например, можно принять $\sum_j a_{ij}^\beta = 1$.

Теперь в качестве веса конструкторской разработки но-

мера i естественно принять величину $\beta^i = \sum_j a_{ij} \alpha^j$.

Таким образом мы получаем:

$$\beta = A^B \alpha. \quad (2)$$

Формула (2) дает отображение множества научно-технических целей на множество опытно-конструкторских разработок.

Для обеспечения опытно-конструкторских разработок должны быть проведены научные исследования прикладного характера. Перечень этих работ мы будем обозначать с помощью вектора γ (γ^i — компоненты этого вектора). Теперь задача группы экспертов состоит в указании перечня и составлении матрицы A^γ значимости прикладных исследований.

Группы экспертов, составляющие матрицы A^B и A^γ , в общем случае состоят из разных лиц, поскольку для решения указанных вопросов требуется различная квалификация и различная направленность научных интересов.

Коль скоро матрица A^γ задана, мы можем, рассуждая аналогично предыдущему, построить отображение множества опытно-конструкторских разработок на множество прикладных исследований.

$$\gamma = A^\gamma \beta. \quad (3)$$

После этого нам остается сделать лишь один шаг. Следующая группа экспертов перечисляет возможные направления фундаментальных исследований. Например, δ_1 — численные методы в теории турбулентных течений, δ_2 — условия стабильности популяций при повышенной радиации, δ_3 — классификация элементарных частиц и т. д.

Далее, та же группа экспертов (может быть расширена за счет привлечения специалистов в области прикладных исследований) составляет матрицу A^δ значимости соответствующих фундаментальных исследований, необходимых для успешного завершения соответствующих прикладных исследований.

В результате мы получаем возможность построить отображение множества прикладных исследований на множество фундаментальных исследований:

$$\delta = A^\delta \gamma. \quad (4)$$

Формулы (2), (3) и (4) позволяют построить отображение

множества целей на множество фундаментальных исследований

$$\delta = A^{\alpha} A^{\gamma} A^{\beta} \alpha_{..}$$

Если веса компонент вектора α заданы, то теперь мы можем вычислить и веса компонент вектора δ .

В результате описанной процедуры мы находим относительную роль отдельных фундаментальных исследований в успешной реализации намеченной программы. Теперь распределителю бюджета уже не представляет труда разделить средства, выделяемые на фундаментальные исследования: он должен разделить их пропорционально весам компонент вектора δ .

Несмотря на существенное различие приемов обработки экспертных оценок, связанных с использованием деревьев цели и решающих матриц, у них есть одна общая черта: сложный вопрос, на который мы должны ответить, расчленяется на ряд более простых. Человек способен проанализировать ситуацию лишь тогда, когда требуется учесть относительно небольшое число обстоятельств (взаимных связей). Поэтому мнение эксперта будет более или менее достоверным лишь в том случае, когда ему приходится отвечать на сравнительно простые вопросы.

Если бы разным экспертам в 1959 году предложили оценить вероятность высадки человека на Луну в 1969 году, то ответы заведомо были бы очень далеки от истины. В то же время если бы было проведено предварительное расчленение проблемы, например, были бы названы основные этапы реализации программы «Аполлон», то применение методики, изложенной в предыдущем параграфе, дало бы значение вероятности немногим меньше единицы.

Успех в реализации эвристической процедуры прямым образом зависит от того, как мы расчленяем проблему. Ведь достоинство метода распределения бюджета состояло прежде всего в умелом разделении проблемы. Вряд ли найдется хотя бы один эксперт, который может высказать суждение об относительной значимости исследований в области радиационной генетики, классификации элементарных частиц или создания математической теории устойчивости движения газа. И в то же время многие эксперты относительно легко ответят на вопрос о роли той информации, которая будет получена в результате исследования фундаментального характера тех или иных прикладных исследований.

Следует, однако, иметь в виду, что никаких общих рекомендаций о способах разделения проблемы нет. Эта процедура определяется прежде всего природой задачи и квалификацией лица (или лиц), подготовляющих проведение анализа: разделение сложного вопроса на цепочку более простых — это всегда некоторая эвристическая процедура, требующая знаний и изобретательности.

Проблема составления расписания работ. В планировании и проектировании огромную роль играют различные задачи теории расписаний — расписаний работ, необходимых для реализации проекта. Поясним их содержание на одной из основных задач этого класса: найти такое распределение ресурсов, а следовательно, такое назначение очередности работ, при котором совокупность работ, составляющая проект, будет выполнена за минимальное время.

Итак, эксперт (проектировщик, конструктор, плановик) определяет перечень работ P_1, P_2, \dots, P_n , необходимых для завершения проекта, и, естественно, требуемый ресурс для его выполнения. Однако выполнение этих работ стеснено многими ограничениями, которые, как правило, удается разбить на две группы.

О г р а н и ч е н и я (α): они описывают взаимную зависимость работ. Это ограничения логического характера. Наиболее типичный пример — ограничения типа графа: выполнению работы номер i предшествует некоторая совокупность работ, без выполнения которых работа номера i начаться не может. Условимся работы обозначать вершинами ориентированного графа, тогда его ребра будут показывать, какие работы и в какой последовательности должны выполняться. Ограничения (α) могут иметь и более сложную логическую природу.

О г р а н и ч е н и я (β): этот тип условий связан с объемом ресурса, который может быть выделен на реализацию проекта.

Обозначим через $v(t)$ вектор ресурса, который может быть выделен на выполнение проекта в год номера t . Через $u^i(t)$ будем обозначать долю работы номера i , которую планируется выполнить в год номера t ($0 \leq u^i \leq 1$), а через $q^i(u^i(t))$ — вектор ресурса, который должен быть выделен для выполнения работы $u^i(t)$. В этих условиях ограничения (β) могут быть представлены в следующей форме:

$$\sum q^i(u^i(t)) \leq v(t).$$

Итак, если векторы $v(t)$ нам заданы, то план реализации проекта сводится к следующей задаче: для каждого интервала времени t должен быть назван перечень работ и доля $u^i(t)$ этих работ, которая должна быть выполнена так, чтобы суммарное время выполнения проекта было минимальным.

Доля $u^i(t)$ определяется в десятичной шкале, а время — дискретно. Поэтому задача построения расписания может быть решена простым перебором, поскольку имеется лишь конечное число возможных вариантов. Однако если число работ достаточно велико, то реализация перебора даже на мощной ЭВМ требует астрономического времени и практически невозможна. И основная трудность состоит в том, чтобы указать порядок выполнения работ, не нарушающий ограничений (α): если нет фундамента, то нельзя начинать строить крышу здания.

Поэтому в задачах теории расписаний, подобных той, которая описана, невозможно обойтись без неформальных эвристических методов.

Если удастся тем или иным образом ранжировать работы, т. е. приписать им вес, и по этому весу определять порядок их выполнения, то задача составления расписания и анализ характеристик плана реализации проекта становятся почти тривиальными.

В 1960 году автором этой брошюры был предложен вариант подобной эвристической процедуры, который получил название логического ранжирования. Она приписывает больший вес той работе, которая предшествует большему количеству работ.

Поясним смысл подобной ранжировки на примере, который проиллюстрирован рис. 3.

Работы P_1 , P_2 и P_3 завершают проект, они одинаково важны и им поэтому естественно приписать один и тот же вес, равный, например, единице, поскольку они предшествуют единственной «работе» — окончанию (приемке) проекта — P_0 .

Работы P_4 и P_9 предшествуют уже двум работам: P_1 и P_0 . Поэтому работам P_4 и P_9 мы припишем вес 2. Такой же вес будет иметь, очевидно, и работа P_7 . Работа P_5 предшествует трем работам: P_1 , P_2 и P_0 . Ее вес будет равен трем. Такой же вес будет у работ P_6 (P_2 , P_3 , P_0) и P_8 (P_4 , P_1 , P_0). Работа P_{10} будет иметь вес 4 — (P_8 , P_4 , P_1 , P_0). Работе P_{12} мы должны приписать вес 6, поскольку она предшествует работам P_9 , P_{10} , P_8 , P_4 , P_1 и P_0 . Работа

P_{11} предшествует шести работам — ($P_7, P_3, P_5, P_1, P_2, P_0$), т. е. тоже имеет вес, равный 6. Такой же вес имеет и работа P_{13} — ($P_{10}, P_8, P_4, P_1, P_3, P_0$). Работа P_{14} предшествует $P_7, P_3, P_6, P_2, P_5, P_1$ и P_0 , т. е. имеет вес, равный 7.

Все наши работы оказались сгруппированными в шесть групп. Выполнение работ надо начинать с группы 1 (работа P_{14}), так как она задерживает наибольшее количество работ (см. рис. 3).

Такое ранжирование имеет много преимуществ. Главное это то, что работы, принадлежащие к одной группе, независимы: их можно производить в любом порядке. Объединяя работы одного веса, мы превратим сложный граф в линейный. Все расчеты для такого графа уже практического труда не представляют.

Изложенный метод можно было бы назвать методом снятия логических ограничений. Это лишь один из многих возможных способов упрощения задачи. Конечно, подобные эвристические подходы в общем случае не дают возможности получить точное, действительно оптимальное решение. Но имея в виду неточность исходных посылок, неизбежные

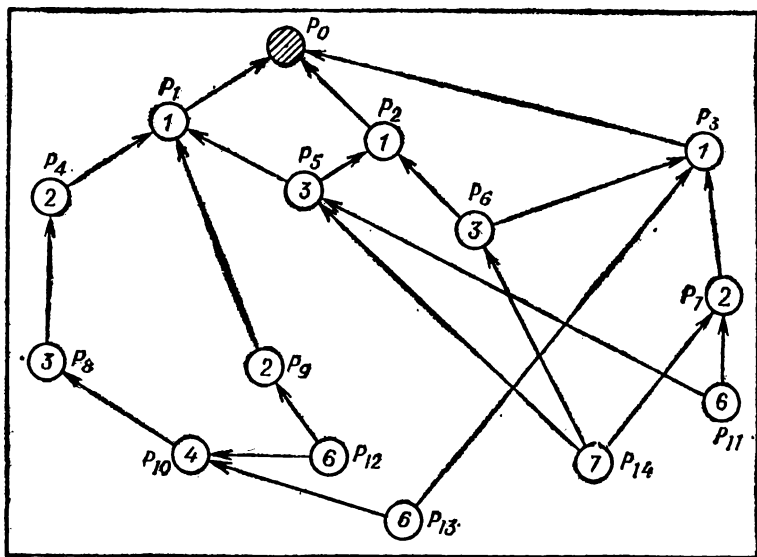


Рис. 3.

помехи, которые не входят в постановку задачи, и многие другие факторы, нами неучтенные, следует признать, что в задачах проектирования, в которых дается оценка сроков (или стоимости), особой точности, как правило, и не требуется. Кроме того, найденный вариант распределения ресурсов всегда может быть использован в качестве первого приближения для более точного расчета, а уточнение может быть сделано с помощью значительно менее трудоемких методов теории возмущений.

В этой главе мы рассмотрели примеры неформальных процедур принятия решений, играющих большую роль в практике проектирования и планирования работ. Несмотря на то что какой-либо теории неформальных процедур нет, а вероятно, и быть не может, тем не менее можно говорить о некоторых общих подходах к их организации. Примеры и были подобраны нами с тем расчетом, чтобы продемонстрировать эти подходы.

IV. ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Некоторые общие вопросы автоматизации проектирования. В последние годы проблемам автоматизации проектирования уделяется все большее и большее внимание, причем это явление характерно для всех индустриально развитых стран, создающих сложные образцы техники и реализующих проекты сложнейших народнохозяйственных комплексов. Постепенно автоматизация проектирования сделалась одной из областей наиболее перспективного использования вычислительной техники и методов междисциплинарных исследований процессов разной физической природы, получивших название системного анализа. Усложнение проектируемых конструкций приходит в противоречие с традиционными принципами проектирования, которые всегда предполагали, что главный конструктор имеет возможность целостного представления проектируемой конструкции.

Поскольку физиологические возможности человека ограничены, а сложность создаваемых конструкций непрерывно растет, то однажды этот тезис перестает быть справедливым. И в последние десятилетия мы начинаем все чаще и чаще сталкиваться с ситуациями, когда главный конструктор или руководитель проекта уже не может эффективно вмешиваться в процесс проектирования.

Обсуждая проблемы организации экспертиз, мы видели, что успешный ответ на сложный вопрос необходимо требует его расчленения на отдельные, более простые. Точно так же и сложный проект требует расчленения процесса проектирования на проектирование отдельных подсистем и агрегатов, разделения обязанностей между различными конструкторами, проектировщиками и исследователями-расчетчиками. И такое положение уже давно имеет место. Создание проекта самолета, крупной водохозяйственной или технологической системы — это всегда дифференцированный труд большого коллектива.

Но расчленение проблемы необходимо предполагает и обратный процесс — процесс объединения, синтеза, который дает возможность представить конструкцию в целом, оценить ее разнообразные качества и соответствие замыслу.

Расчленение процесса проектирования поначалу не вызывало проблем. Возьмем, например, такую техническую систему, как самолет. Проектирование планера естественным образом отличается от выбора и проектирования двигателя. Аэродинамические и прочностные расчеты делают представители различных профессий и т. д. Такая же ситуация наблюдалась всюду. И всюду постепенно возникали традиционные формы разделения труда.

Долгое время и процесс синтеза проекта также не вызывал особых осложнений: по мере усложнения проектируемых конструкций совершенствовались и методы проектирования. Но вот все чаще и чаще эти традиционные методы проектирования стали давать сбои.

Прежде всего начали недопустимо удлиняться сроки проектирования. Но это было бы еще полбеды. На испытания стали поступать конструкции, все менее и менее соответствующие замыслу. И у конструктора до начала испытаний не было возможности достаточно хорошо убедиться в том, насколько созданные машина или технологический комплекс соответствуют замыслу. В результате — неизбежные переделки, резкое удорожание конструкции и удлинение сроков реализации замысла до десятилетий! А это означает, что в строй вводится конструкция (или технология) уже устаревшая, отвечающая техническому уровню минимум десяти-двадцатилетней давности.

Анализируя эти явления, мы убеждаемся в том, что основные трудности связаны с синтезом, с увязкой всего многообразия особенностей будущей конструкции. Эти трудности растут экспоненциально вместе с ростом размерности,

т. е. количеством параметров, которые определяют конструкцию. И квалификация проектировщиков здесь мало чем может помочь—традиционная технология в принципе не может справиться с возрастающей сложностью проекта—надо менять технологию проектирования.

Все эти обстоятельства начали понемногу пониматься практиками во всех странах, в частности в США и Швеции, где и начали впервые создаваться системы автоматизации проектирования.

Возникновение и формирование концепций автоматизированного проектирования происходило примерно по следующей схеме.

Сначала начали автоматизировать чертежные работы — эту очень трудоемкую часть любого процесса проектирования. Появились чертежные автоматы. Они, конечно, оправдали затраченные средства. Однако ничего принципиально улучшающего проект или ускоряющего его окончание они не внесли, да и не могли внести.

Одновременно шло широкое внедрение в практику инженерных расчетов, например прочностных, гидравлических, аэродинамических характеристик, с помощью методов машинной математики. Эти работы существенно усовершенствовали разнообразные процедуры проектных расчетов, свели до минимума возможные ошибки, повысили общую культуру проектирования, однако также не привели к какому-либо существенному сокращению сроков проектирования.

Следующий этап — создание автоматизированных рабочих мест конструктора. Это уже новый уровень мышления. Рабочие места оказывались непосредственно связанными с ЭВМ, которая заменила конструктору традиционную линейку или арифмометр, появились простейшие дисплеи, позволившие конструктору реализовать обратную связь с ЭВМ. Идея автоматизированных рабочих мест появилась в конце шестидесятых годов, одновременно с появлением систем разделения времени. С их внедрением было связано немало надежд. И хотя эти надежды далеко не все оказались оправданными, затраты на создание автоматизированных рабочих мест, конечно, вполне окупились результатами. Одно то, что они потребовали значительного повышения квалификации и общей эрудиции конструктора, уже давало многое. Еще одним важным следствием появления автоматизированных рабочих мест было внедрение

в процедуры проектирования идеи диалога ЭВМ-конструктор.

Однако и автоматизация рабочих мест конструктора, которая произошла в ряде стран в начале семидесятых годов, также не решила основной проблемы. Сроки между возникновением замысла конструкции и ее реализацией по-прежнему оставались значительными. Конструкции (или их опытные образцы), предъявляемые к испытаниям, требовали в процессе испытаний многочисленных и трудных доделок, а подчас и существенного изменения их самих.

Стала очевидной необходимость создания взаимоувязанной системы проектирования, включающей и систему программ для инженерных расчетов, и автоматизированные рабочие места, и разнообразные диалоговые процедуры, и, конечно, автоматизацию всех графических работ. Сейчас в основных развитых странах как раз и ведется интенсивная работа в области создания и ввода в строй подобных автоматизированных систем проектирования.

Пока еще рано подводить итоги и говорить о результатах эксплуатации таких систем и об их эффективности. С их вводом связывают большие надежды, и автоматизированное проектирование переживает определенный бум. И именно в связи с этим мне хотелось бы предостеречь против некоторых иллюзий—создание полноценных систем автоматизированного проектирования потребует многих лет и больших усилий.

Прежде всего для них необходима весьма совершенная вычислительная техника совместно с развитой системой ее коллективного использования. Системы проектирования, как они задумываются сегодня, требуют коллективного использования банков данных, систем моделей и программ. Их эксплуатация потребует большого количества уникальных по объему хранимой информации магнитных дисков, специальных наборов терминальных устройств и т. д.

Наконец, создание специализированного математического обеспечения потребует также многих и многих лет упорной работы многочисленных коллективов высокой квалификации: по современному представлению любая система автоматизации проектирования — это прежде всего сложнейшая имитационная система. Поэтому ожидать быстрого появления полноценных систем автоматизированного проектирования не следует. Реально их появления можно ожидать в середине следующего десятилетия.

Из этой оценки должен следовать один важный практи-

ческий вывод — системы должны создаваться с таким расчетом, чтобы они могли вводиться в строй постепенно, по мере готовности отдельных элементов, блоков, т. е. так, чтобы эксплуатация отдельных частей системы могла начинаться задолго до завершения всей системы. Это важный принцип. Он позволит сэкономить не один миллион рублей. Но его реализация потребует не только специальной организации программного обеспечения, но и специальной организации работы пользователей — групп конструкторов и проектировщиков.

Теперь относительно проблемы диалога. Сегодня все согласны с тем, что система автоматизированного проектирования — это некоторая специальная диалоговая система, что диалог человек-ЭВМ должен занимать центральное место в процессе проектирования. Но, к сожалению, многие думают, что никакой проблемы диалога не существует: были бы необходимые терминальные устройства и программы решения отдельных инженерных задач. Это глубокая ошибка. И если она не будет устранена своевременно, то создание систем автоматизированного проектирования может привести к разочарованию и неудаче. В самом деле, эффективность любой сложной конструкции, будь то промышленный комплекс, самолет или водохозяйственная система, определяется тысячами различных параметров. Не будем же мы перебирать все возможные сочетания этих параметров в режиме слепого диалога. Значит, должен быть экономный способ организации поиска наилучшего варианта!

По существу, сказанное означает создание специальной системы правил и алгоритмов, которые и составят основу новой технологии автоматизированного проектирования сложных объектов. Без создания этой новой технологии системы автоматизированного проектирования, подобно автоматизированным рабочим местам, будут полезным инструментом, который, конечно, усовершенствует процесс проектирования, но вряд ли внесет в него те изменения, которые его качественно улучшат.

Итак, центральная задача в создании систем автоматизированного проектирования — это разработка новой технологии проектирования. И, конечно, разработка такой технологии уже начата во многих КБ и проектных организациях, где создаются и начинают использоваться подобные системы. Приспособление конструкторов, проектировщиков к новой технике, использование нового математическо-

го обеспечения и есть уже элементы этой рождающейся технологии. Но ее создание носит в значительной степени интуитивный характер и не превратилось пока еще в целенаправленные совместные исследования инженеров-проектировщиков и математиков.

С чего должна начинаться подобная деятельность? Такой вопрос автор этой работы задал однажды одному из наших ведущих конструкторов. Ответ был совершенно однозначный: «Вы, машинные математики, должны помочь прежде всего мне — генеральному конструктору. Вместе со мной вы должны разработать такую методику проектирования, которая позволяла бы уже на самых ранних этапах проектирования достаточно правильно выбрать основные параметры конструкции и оценить различные характеристики ее эффективности и на протяжении всего процесса проектирования контролировать изменение этих характеристик так, чтобы в результате предъявить к испытаниям конструкцию, уже не требующую доводок». Я думаю, что эти принципы основополагающие. И их реализация может действительно решающим образом улучшить существующее положение с проектированием сложных объектов. И в то же время надо отдавать себе отчет в том, что эта задача далеко не проста и потребует создания специального аппарата.

Несколько замечаний о «теории» неформальных процедур и ее выводах для проектирования сложных технических конструкций. Создание сложных технических конструкций, подобных производственному комплексу, самолету, электронной машине и т. д., — это прежде всего акт творческий, и он не может быть никогда до конца формализован. Этот факт мы будем считать аксиомой и из нее будем исходить.

Следует заметить, что целый ряд специалистов как на Западе, так и у нас полагают, что акт творчества в проектировании в значительной степени может быть заменен специально организованной системой обработки статистического материала.

Статистическая обработка параметров существующих (или возможных) конструкций, конечно, очень важна, и ее ни в коем случае не следует недооценивать. Но ее недостаточно в принципе. Использование только одного статистического материала позволяет создать конструкцию, лишь имеющую аналоги в отдельных технических решениях, т. е. подобную (или близкую) уже существующим.

Действительно оригинальные конструкции, требующие качественно новых технических решений, конструкции завтрашнего дня всегда требуют нетрафаретного мышления, смелости и таланта. Получать их на основе статистики невозможно — это тоже постулат, который мы принимаем.

Я думаю, что многие разделяют эти принципы. Но приняв в качестве постулата невозможность полной формализации, надо сделать следующий шаг — понять место и значение формализованных методов, т. е. методов, использующих математическое описание решаемых задач, понять, чем и как они могут быть полезны конструктору, как они должны быть объединены с неформальными процедурами.

Сегодня проблемы изучения и организации эвристических процедур привлекают внимание широкого круга специалистов, и им посвящена огромная литература. И уже возникло определенное понимание принципов, которые лежат в их основе. Мы об этом говорили в предыдущей главе, где были приведены некоторые примеры. Большой вклад в этой важной области был сделан Ю. Б. Гермейером, который развил новую систему взглядов на содержание неформальных процедур и оценки, получаемые с их помощью. Ю. И. Журавлев предложил некоторую общую схему формализации множества эвристических процедур и выбора среди них наилучшей. Одним словом, сегодня уже существует достаточно прочная опора в накопленных знаниях и понимании предмета, позволяющая строить эвристические процедуры не только на основе интуиции.

Но важнейшим из всех принципов является принцип разделения, о котором мы подробно говорили в предыдущей главе. Дело в том, что конструктор, как бы талантлив он ни был, может оперировать только с относительно небольшим объемом информации (параметров, критериев и т. д.). И вся технология проектирования должна быть такой, чтобы каждому отдельному субъекту — участнику процедуры приходилось решать только относительно простые задачи. Весь успех в конечном счете зависит от этого. Примеры предыдущей главы были призваны это проиллюстрировать. Здесь же необходимо отметить еще одну особенность. Это разделение — декомпозиция — должно быть приспособлено и к сборке — синтезу. К сожалению, никаких общих рекомендаций здесь нет. В каждом отдельном случае иерархическая структура вопросов или задач, решаемых проектировщиками, и их внутренние

связи должны изучаться и проектироваться специальным образом.

Поясним сказанное на примере проектирования самолета, хотя многое из того, что будет говориться ниже, справедливо для любых конструкций.

На вершине рассматриваемой иерархии находится главный конструктор машины, и перед ним стоит проблема такого выбора (назначения) параметров, который бы обеспечил решение задач, поставленных перед ним заказчиком. Если речь идет о пассажирском самолете, то заказчик — ГВФ. Он хочет, например, иметь самолет для грунтовых аэродромов, который был бы лучше тех, которые он сегодня эксплуатирует, — ЯК-40, АН-24 и т. д. Если речь идет об истребителе, то заказчик хочет иметь самолет, который был бы лучше существующих истребителей (в частности, побеждал в бою существующие истребители). Задача так и должна ставиться — это естественная постановка на естественном языке. Создать некоторый функционал $F(x)$, зависящий от всех параметров самолета x , максимум которого гарантировал бы решение задачи, никакой математик или конструктор не сможет.

Но объективно такой функционал существует достаточно часто, во всяком случае всегда, когда технический уровень промышленности и уровень знаний законов функционирования конструкции позволяют в принципе создать подобный самолет, т. е. если поставленная задача разрешима. В самом деле, если будут представлены две конструкции, то эксперт (заказчик, генеральный конструктор), проведя всесторонние испытания, сможет выбрать лучшую. Условия, когда такая ранжировка возможна, мы будем называть условиями компетентности. Они означают, что у нас (точнее, у заказчика или конструктора) есть представление о том, что значит «лучше». Только в этих условиях имеет смысл решать задачу, и только в этих условиях мы можем выбрать лучшую (или лучшие) конструкцию.

Таким образом, перед главным конструктором стоит, вообще говоря, непосильная задача выбора вектора параметров x , обеспечивающих максимум функционала $F(x)$, который мы не можем выписать в явном виде.

Давайте тем не менее представим себе возможные пути ее решения. Кажется, что для этого мы можем использовать идеи имитации. Рассмотрим оба типа самолета, о которых шла речь: сначала обсудим ситуацию с истребителем. Предпо-

ложим, что мы создали систему, имитирующую бой двух истребителей. Закладывая в ЭВМ параметры проектируемого и какого-либо из существующих самолетов-истребителей, мы разыгрываем серию боев нашего будущего самолета с машиной, с которой мы собираемся его сравнить. В результате набираем необходимую статистику. Она нам и покажет, какой из самолетов «лучше». В самом деле, ведь речь идет о завоевании господства в воздухе. И если так оказалось, что большее количество боев выиграл проектируемый самолет, то это и будет означать, что он лучше существующего.

С самолетом для гражданского воздушного флота дело будет обстоять несколько сложнее: там нет никакой явной характеристики «качества» самолета. Но проводя серию имитационных экспериментов, мы дадим возможность эксперту, если ситуация отвечает гипотезе компетентности, выбрать более предпочтительный вариант.

Значит, имитационная система в принципе позволяет сравнивать варианты и отбирать наилучший. А это и означает возможность поиска максимума функционала без знания его явного выражения. Однако в реальности дело обстоит гораздо сложнее.

Как правило, первоначальный вариант не будет достаточно хорошим. И перед конструктором возникнет типичная задача улучшения параметров самолета, т. е. замена одной системы параметров другой. А вот для этой цели имитационная система без надлежащего «интеллекта», не оснащенная специальной системой процедур, практически бесполезна. Для того чтобы в этом убедиться, попробуем оценить необходимый нам ресурс машинного времени: «проигрывание» одного боя занимает на машине не меньше одной минуты. Набор необходимой статистики — это уже несколько часов машинного времени. Значит, один акт имитационного эксперимента займет несколько часов машинного времени. А сколько же потребуется конструктору провести подобных актов, прежде чем он получит конструкцию, которая его удовлетворит?

Перед конструктором стоит задача улучшить параметры. Часть этих параметров он может изменять, варьировать, опираясь на собственный опыт, интуицию. Но изменение одного параметра изменяет другие. Вся картина начинает «плыть». И чем сложнее конструкция, тем хуже работает интуиция. Вопрос «Как выбрать новые параметры, чтобы самолет сделался «лучше?»» оказывается чересчур

сложным. В пределе вместо направленного поиска мы приходим в конце концов к простому перебору, требующему, быть может, тысяч итераций, т. е. такой затраты машинного времени, которая лежит, конечно, за пределами наших возможностей. И этот вывод никак не связан с качеством ЭВМ. Он остается справедливым и для гипотетических ЭВМ. Он определяется природой задачи, ее уровнем сложности. Вот в этом и состоит ахиллесова пята имитации, если ее рассматривать в качестве инструмента оптимизации.

Имитационная система — это в принципе машинный аналог испытательного полигона. Это инструмент проверки, может быть, очень незначительного улучшения. Сам по себе такой факт, конечно, очень важен: прежде чем начать испытание в натуре, мы можем проэкспериментировать с машинной моделью. Операция бесконечно более дешевая. Но тем не менее создание имитационной системы — еще не решение проблемы.

Значит, для действительно эффективного использования имитационной системы и всей системы автоматизированного проектирования необходимо вернуться к тому, о чем говорилось в начале этого параграфа. Необходимо учитывать тот факт, что и генеральный конструктор обладает определенными и вполне ограниченными психофизиологическими возможностями обработки информации. И следовательно, необходима декомпозиция проблемы. Последнее означает, что требуется система процедур, позволяющая конструктору и прежде всего главному конструктору, оперируя с ограниченной информацией, вести направленный поиск оптимальных параметров конструкции.

Вариант схемы процедур высшего уровня. Обсуждение процедур автоматизированного проектирования мы начнем с высшего уровня — уровня главного конструктора. Как уже было сказано, конструктор может мыслить относительно небольшим числом параметров F_j ($j=1, 2, \dots, n$). И эти параметры, как правило, являются агрегатами, т. е. некоторыми функциями конструктивных параметров самолета x^i , $i=1, 2, \dots, N$, причем $N \gg n$.

Как следует из опыта организации и использования неформальных процедур, агрегированные характеристики, которыми мыслит эксперт всегда достаточно индивидуализированы. Это, конечно, не значит, что системы автоматизации проектирования должны быть строго индивидуальны. Отдельные блоки системы, общая схема

операционной САПР *, структура банков данных, основная часть математического обеспечения должны быть стандартизированы. Но не может не приниматься во внимание тот факт, что главный конструктор машины по-своему думает о ней, имеет собственные оценки и критерии, отличные от тех, которые имел бы другой главный конструктор. Будучи достаточно универсальной, система автоматизированного проектирования должна настраиваться на определенное конструкторское бюро или проектную организацию. Это значит, что входной язык САПР должен быть расширяемым и определенная часть математического обеспечения должна специально создаваться на основе тех требований, которые формулирует главный конструктор.

Не следует, конечно, и переоценивать этого индивидуального элемента. Существует целый ряд характеристик конструкции (самолета, в частности), которые являются общепринятыми. Например, для самолета $F_1(x)$ — это максимальная скорость, $F_2(x)$ — маневренность (минимальный радиус виража), $F_3(x)$ — потолок и т. д. Но, кроме того, в зависимости от характера проектируемого самолета и особенностей мышления конструктора могут возникнуть и специфические параметры. Например, если речь идет о пассажирском лайнере или транспортном самолете, то может возникнуть потребность в расчете прочностных или экономических характеристик. Перестройка математического обеспечения в этом случае не будет носить принципиального характера, поскольку эти характеристики практически всегда вычисляются в одном из блоков имитационной системы.

Очень важным моментом является следующее утверждение: вычисление агрегированных характеристик должно быть достаточно простым с тем, чтобы оно могло быть проведено с помощью математического обеспечения, которое содержится в отдельных блоках системы. В частности, это расчет тактико-технических характеристик, который на БЭСМ-6 занимает секунды машинного времени.

Но отсюда следует еще один важный вывод: вполне реально решать задачи оптимизации вида:

$$F_i(x) \Rightarrow \max, \quad (1)$$

где $x \in X$ — области возможных параметров, т. е. допустимых современными уровнями техники и технологии, а так-

* САПР — системы автоматизированного проектирования.

же концепцией компоновочной схемы. Заметим, что определение множества X , т. е. системы ограничений, — один из труднейших этапов всего процесса проектирования — требует весьма высокой конструкторской квалификации.

Вектор x , реализующий решение задачи (1), будем обозначать через x_i . В результате решения этой задачи будут найдены числа $F_{i0} = F_i(x_i)$. Эти числа характеризуют предельные возможности самолетов, допустимые в рамках данной компоновочной схемы современным уровнем технологии и техники. Самолет, обладающий параметрами $x_i = \{x_i^s\}$, можно назвать рекордистом i -го типа. Это может быть самолет максимальной дальности, максимальной маневренности, максимальной высотности, максимальной грузоподъемности и т. д. В исследовании операций существует понятие идеальной схемы, или идеального решения. Самолеты-рекордисты являются аналогами этих идеальных и не реализуемых на практике конструкций. Разумеется, ни один из этих рекордистов не будет пригодным для решения тех задач, ради которых он проектируется. Но в реальном самолете необходимо должны сочетаться основные качества рекордистов. Реальная конструкция — гармония основных характеристик самолета. И эта гармония определяется, конечно, его назначением. А вот структура, сочетание этих характеристик в значительной степени зависят от опыта и таланта главного конструктора.

Итак, будем считать, что критерии F_i нам назвал главный конструктор, а значения F_{i0} мы вычислим. Составим новую целевую функцию:

$$W(x, \lambda) = \max_i \lambda^i \left(\frac{F_{i0} - F_i(x)}{F_{i0}} \right). \quad (2)$$

Выражение в скобках всегда меньше единицы. Оно показывает, насколько реальный самолет хуже рекордиста номера i по показателю F_i , причем чем больше это выражение, тем больше отличается самолет с параметрами $x = \{x^s\}$ от рекордиста номера i . Выражение

$$\max_i \frac{F_{i0} - F_i(x)}{F_{i0}}$$

показывает нам, по какой из характеристик и на сколько наш самолет дальше всего от идеальной схемы.

Если бы мы нашли такой вектор $x^* \in X$, который решал задачу

$$\max_i \frac{F_{i0} - F_i(x)}{F_{i0}} \Rightarrow \min,$$

то это означало бы, что мы нашли совокупность параметров $\{x^*\}$, которые определяют самолет, наиболее близкий к рекордистам, если считать, что все характеристики равноценны. Но мы знаем, что для самолетов разных назначений роль различных характеристик различна. Положительные числа λ^i определяют относительную значимость этих характеристик для решения задач, ради которых заказывается самолет. Чем больше величина λ_i , тем важнее для нас характеристика F_i . Вектор $\lambda = \{\lambda^i\}$ называют вектором концепции самолета. На него естественно наложить ограничения:

$$\lambda^i \geq 0; \quad \sum_{i=1}^n \lambda^i = 1. \quad (3)$$

Покажем теперь, как может быть использован функционал $W(x, \lambda)$.

Предположим сначала, что главный конструктор знает на формальном уровне тот смысл, который надо вкладывать в понятие «оптимизация конструкции». Это значит, что он может для каждого вектора параметров x дать формальный способ определения значения функции $\Phi(x)$, максимум которой при $x \in X$ дает нам наилучшую конструкцию. Мы видели, что для истребителя это процент выигранных боев при достаточно большом количестве проведенных экспериментов.

В предыдущем параграфе мы объяснили, что прямое решение задачи

$$\Phi(x) \Rightarrow \max$$

невозможно вследствие чрезвычайно большой размерности вектора x и того обстоятельства, что для фиксированного x однократное вычисление критерия $\Phi(x)$ требует многих и многих часов работы ЭВМ класса БЭСМ-6.

Но, используя функционал (2), можно значительно упростить эту процедуру.

Предположим, что мы зафиксировали вектор λ . Функционал $W(x, \lambda)$ составлен из небольшого числа функционалов $F_i(x)$ (напомним, что $i=1, 2, \dots, n$, n невелико, и каждый из $F_i(x)$ вычисляется просто). Поэтому мы можем решить задачу:

$$W(x, \lambda) \Rightarrow \max_x, \quad (4)$$

В результате мы находим $x=x(\lambda)$, т. е. вектор оптимальных параметров для заданной концепции. Теперь мы можем построить функцию

$$\hat{W}(\lambda) = W(x(\lambda), \lambda),$$

которая является решением задачи (4) для любых λ , т. е. для любых концепций. Нам осталось только выбрать концепцию — вектор λ . Для этого достаточно рассмотреть задачу максимизации критерия $\Phi(x)$ на множестве $\{x=x(\lambda)\}$, т. е. решить задачу:

$$\hat{\Phi}(\lambda) = \Phi(x(\lambda)) \Rightarrow \max. \quad (5)$$

Так как размерность вектора λ гораздо меньше (на несколько порядков) размерности вектора x , то задача (5) оказывается уже качественно проще исходной:

$$\Phi(x) \Rightarrow \max.$$

Из решения задачи (5) мы находим λ , т. е. выбираем концепцию, по ней находим определяемые ею параметры x и затем переходим к следующему этапу проектирования.

Если функционал $\Phi(x)$ составлен явно, то в принципе при оптимизации конструкции (т. е. после задания компоновочной схемы) мы можем обойтись и без экспертных процедур. И в этом случае возникает лишь математическая задача исследования того, при каких условиях подобная двухэтапная оптимизация достаточно хорошо аппроксимирует оптимальную конструкцию. Эта проблема самостоятельная, и мы ее обсуждать не будем.

В реальности, как правило, никакого функционала $\Phi(x)$ в явном виде выписать не удастся. Главный конструктор, который может мыслить только категориями конструкции, может лишь сравнивать концепции самолета, используя, конечно, систему имитации. И вот в этих условиях, т. е. когда в его распоряжении имеется лишь небольшое число имитационных экспериментов, он должен выбрать концепцию, наилучшим образом, с его точки зрения, соответствующую исходному замыслу. И задача математиков, проектирующих САПР, — в максимальной степени облегчить этот поиск, организовать наиболее простую его схему. Например, можно поступить следующим образом.

В пространстве возможных концепций строится сетка с узлами λ_k , причем шаг сетки должен быть согласован с

главным конструктором. В той области пространства концепции λ , где наиболее вероятно ожидать успеха, шаг должен быть мельче.

Для каждого из векторов λ_k решается задача (4) и составляется множество $x_k = x(\lambda_k)$. Такое множество можно назвать множеством прототипов. И для каждого из прототипов (и только для них) организуется имитационный эксперимент, результат которого мы условно обозначим через $\Phi(x_k)$. Вот эти результаты мы и предъявляем главному конструктору. Он сам (или вместе с заказчиком) производит первую отбраковку. В результате в пространстве концепций возникает некоторое множество S_1 . В окрестности точек этого множества может быть построена новая, более мелкая сетка и т. д.

Если конструктор и заказчик остановятся на некотором варианте концепции $\lambda = \lambda^*$, то мы говорим, что прототип выбран.

Если главный конструктор такой выбор сделать не может, это означает, что либо множество критериев F_i было слишком узким и его надо расширить, либо неудачно выбрана компоновочная схема, либо в рамках технических и технологических возможностей, которыми располагает промышленность, нужную конструкцию сделать нельзя*.

* * *

На этом мы заканчиваем наше фрагментарное знакомство с системным анализом, его инструментарием, возможностями и перспективами. Объединение формального и неформального, а точнее и неформализуемого, и есть, наверное, главное содержание этой дисциплины, возможности которой очень широки — от сравнительно простых задач, таких как, например, организация экспертиз, составление расписания работ, имитационное моделирование и до проблемы автоматизации проектирования, проблемы, от решения которой во многом зависит не только сокращение сроков и стоимости разработки все усложняющихся технических и других систем, но и их реализация.

* Идея введения пространства компоновок и развитого на его основе аппарата принадлежит проф. П. С. Краснощекову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов А. А. Теория организации или тектология. М., 1913.
2. Гермейер Ю. Б. Математическая теория исследования операций. М., «Наука», 1971.
3. Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами. М., «Наука», 1975.
4. Данилов К. П. и Шварц С. С. О биологических макросистемах.— В сб.: Наука и человечество. М., «Знание», 1975.
5. Устинов В. А. и др. Опыт имитационного моделирования историко-социального процесса.— «Вопросы истории», 1976, № 11.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
I. Исследование операций и неформальные процедуры	5
Исследование операций	5
Возможные типы гипотез	9
Неопределенности, связанные с активным партнером	15
II. Системный анализ и имитация	19
О термине «системный анализ»	19
Модели и моделирование	24
Имитационные системы	32
III. Экспертизы и эвристические процедуры	36
Простейшие экспертизы	36
Субъективные вероятности и прогнозирование	37
Метод решающих матриц	40
Проблема составления расписания работ	44
IV. Об автоматизации проектирования	47
Некоторые общие вопросы автоматизации проектирования	47
Несколько замечаний «о теории» неформальных процедур и ее выводах для проектирования сложных технических конструкций	52
Вариант схемы процедур высшего уровня	56
Литература	62

Никита Николаевич МОИСЕЕВ
НЕФОРМАЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Гл. отраслевой редактор
В. П. Демьянов.
Редактор Г. Г. Карбовский.
Мл. редактор Т. Г. Иншакова.
Обложка художника Л. П. Ромасенко.
Худож. редактор М. А. Бабичева.
Техн. редактор А. М. Красавина.
Корректор Каночкина В. В.

ИБ № 1686

Т 00895. Индекс заказа 94 303.
Сдано в набор 11.01.79 г.
Подписано к печати 12.02.79 г.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типограф-
ская № 3 Бум. л. 1. Печ. л. 2.
Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,37
Тираж 38 330 экз. Цена 11 коп.
Издательство «Знание». 101835. ГСП,
Чеховский полиграфический комбинат
Государственного комитета СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной
торговли
г. Чехов Московской области. Зак. 3091

11 коп.

Индекс 70096



$f(x) \Rightarrow \max$
 $x \in G$