

Получаем условие неотрицательности запаса товарного плутония в системе в виде

$$P_r^0 + \bar{P}_r - P_r - \alpha_{r-1} + \alpha_r = 0, \\ \alpha_r \geq 0, \quad r = r_0, \dots, R'.$$

В задаче используется экономический критерий в его денежном выражении, наиболее полно отвечающий поставленной задаче исследования:

$$Z_i = \sum_f \sum_t (K_{f,t,i} + I_{f,t,i}) (1 + \sigma_{\text{пр}})^{4-t},$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — норматив для приведения разновременных затрат; $K_{f,t,i}$ — капиталовложения в АЭС f -го типа в год t в i -й стране; $I_{f,t,i}$ — издержки эксплуатации АЭС f -го типа в год t в i -й стране.

На первом этапе задача решается M раз для каждой страны в национальных рамках, т. е. с ограничениями, накладываемыми на ввод мощности в данной стране и с собственными запасами нарабатываемого плутония. Это соответствует реальным возможностям каждой страны. В результате минимизации получаем M оптимальных решений, которые определяют оптимальные структуры ядерной энергетики в каждой стране.

На втором этапе решения задачи минимизируется целевая функция, записываемая для всей системы в целом:

$$Z = \sum_{i=1}^M \frac{Z_i - Z_i^0}{Z_i^0}.$$

Такая форма целевой функции обеспечивает минимальные отклонения от оптимальных национальных планов развития ядерной энергетики каждой из стран — членов СЭВ. В то же

время запись делает целевую функцию безразмерной, и это позволяет выражать Z_i как в переводных рублях, так и в национальной валюте.

В том случае, когда необходимо отдать предпочтение какой-либо стране из-за целесообразности размещения в ней большего числа определенных типов АЭС, в целевую функцию вводятся коэффициенты предпочтения ρ_i . Они могут быть определены экспертными методами.

Функция цели в этом случае

$$Z = \sum_{i=1}^{M-1} \rho_i \frac{Z_i - Z_i^0}{Z_i^0} + \frac{Z_M - Z_M^0}{Z_M^0}.$$

В заключение следует отметить, что многокритериальные оптимизационные задачи, как и любые оптимизационные задачи, следует решать не одним, а несколькими методами ввиду неполной адекватности математической модели реальной народнохозяйственной задаче. Поэтому полученные решения должны быть многовариантными для оценки их лицами, принимающими решение.

Поступила в Редакцию 24.IV.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзерман М. А. «Автоматика и телемеханика», 1975, № 5, с. 83.
2. Батов В. В., Корякин Ю. И. Экономика ядерной энергетики. М., Атомиздат, 1969.
3. Волкович В. Л. В кн.: Кибернетика и вычислительная техника. Вып. 1. Киев, «Наукова думка», 1969, с. 44.
4. Волкович В. Л. В кн.: Сложные системы управления. Киев, «Наукова думка», 1968, с. 100.
5. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М., «Наука», 1964.
6. Echerrode R. «Manag. Sci.», 1965, v. 12, p. 3.
7. Вирцер А. Д., Левенталь Г. Б., Чернавский С. Я. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 6, с. 955.

УДК 621.311.2:621:039+001.57+519.283

Учет фактора неопределенности

при прогнозировании развития ядерной энергетики

ЧЕРНАВСКИЙ С. Я.

Опыт прогнозирования развития ядерной энергетики показал, что наиболее продуктивный инструмент для этого — математические модели. Для долгосрочного прогнозирования была разработана модель [1, 2], в которой учитывался экономический критерий системы. Модель представляет совокупность линейных ограничений вида

$$Ax = b, \quad x \geq 0, \quad (1)$$

где вектор x — искомая стратегия развития системы; A — матрица; b — вектор ограничений,

и линейного функционала, минимизируемого на области (1),

$$cx \rightarrow \min, \quad (2)$$

где c — вектор удельных затрат.

Искомую стратегию x при известных A , b и c определяют одним из методов линейного программирования.

Известные модели [3—8], обладая специфическими особенностями, имеют ту же, что и выражения (1) и (2), математическую постановку задачи, эквивалентную задаче линейного программирования. Особенностью любой модели линейного программирования — детерминированность, однозначность всех экзогенных данных модели, входящих в массивы A , b и c .

Однако ситуация в прогнозировании развития ядерной энергетики такова, что многие важные характеристики точно не известны. Они и не могут быть точно известны, поэтому при моделировании представляются в неопределенной форме, как правило, в виде интервалов возможных значений. Есть несколько факторов, обуславливающих неопределенность характеристик, например нестабильность объекта исследования (проявляющаяся, в частности, в неоднозначности направлений технического прогресса), ограниченность процесса познания, психологические особенности людей — источников прогнозов и т. п. В рассматриваемой задаче неопределенными являются капиталовложения в АЭС с быстрыми реакторами, стоимость добычи и запасы природного урана, темпы роста ядерной энергетики на перспективу, сроки освоения быстрых реакторов и др. Поэтому в условиях неопределенности невозможно применение критерия оптимизации в виде выражения (2). Попытка преодолеть эту неадекватность модели линейного программирования многовариантными, но с использованием детерминированных данных расчетами мало помогает делу, что подтверждено исследованием [9]. Неопределенность в большинстве случаев приводит к многозначности прогнозов структуры ядерной энергетики и делает необходимым разработку иной методической базы, иного инструмента оптимизации, учитывающего фактор неопределенности.

Заметим, что механизм формирования значений большинства факторов, который в момент прогнозирования представляется в неопределенной форме, не является вероятностным. Это относится к таким, например, показателям, как запасы природного урана, сроки освоения коммерческих быстрых реакторов, капиталовложения в них и т. п. Так как неопределенность не сводится в задаче прогнозирования структуры ядерной энергетики к случайности, нецелесообразно использовать методы стохастического программирования [10].

В [8] также отмечается, что факторы, наиболее сильно влияющие на структуру ядерной энергетики, сосредоточены в векторе c , т. е. в коэффициентах функционала детерминированной оптимизационной задачи. Эти факторы — капиталовложения в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами. Рассмотрим этот случай оптимизации в условиях неопределенности, когда вектор b и матрица A заданы в детерминированной форме, вектор c — в неопределенной. Задачу определения оптимальной стратегии в заданной таким образом неопределенной ситуации назовем задачей первого типа [11].

Решение задач первого типа. Пусть множество допустимых стратегий развития системы ядерной энергетики задано соотношениями (1). Задано также множество D возможных значений вектора c . Предполагается, что управлять выбором какого-либо вектора c невозможно, т. е. существование множества D отражает неполноту знания характера будущего развития системы, с одной стороны, и объективную неопределенность развития системы в момент прогнозирования, с другой. В такой ситуации нельзя непосредственно воспользоваться критерием (2) минимума приведенных затрат, поскольку он не имеет смысла для множества D . Далее предполагается, что D — выпуклое множество. Метод, описанный в [11], оперирует не непрерывным множеством, а дискретным набором векторов c_1, c_2, \dots, c_s из этого множества. В дальнейшем в качестве дискретного набора используется совокупность крайних точек. Доказано, что, дискретизируя выпуклое множество D его крайними точками и применяя метод, предложенный в [11] к этому дискретному набору, можно определить стратегии, оптимальные на всем множестве D . В связи с этим метод учета неопределенности характеризуется следующим.

1. Метод оптимизационный, в качестве критериев оптимизации используется совокупность критериев теории статистических решений, а именно критерии Вальда, Севиджа, Лапласа и Гурвица. По критерию Вальда рассчитывается стратегия, которая по сравнению с любой другой имеет наименьшие затраты при наихудших для данной стратегии условиях, определяемых на множестве D . По критерию Севиджа находится стратегия с наименьшим максимальным риском, по критерию Лапласа — с наименьшими средними, по критерию Гурвица — с наименьшими взвешенными затратами. В последнем случае с помощью априорно заданного коэффициента, постоянного для каждой стра-

тегии, «взвешиваются» минимальные и максимальные затраты.

2. Оптимальную стратегию находят на всем множестве допустимых стратегий [см. выражение (1)] и на всем множестве возможных значений вектора c — множестве D .

3. С использованием этого метода не происходит произвольного отбрасывания части данных или, наоборот, необоснованного привлечения несуществующих данных (например, при сведении неопределенности к случайности).

4. Метод ориентирован на использование программ линейного программирования.

Рекомендуется такой порядок действий при расчетах.

1-й этап. С помощью специально разработанного метода организуется работа по формированию экзогенных данных модели.

2-й этап. В соответствии с целями расчета эти данные разделяются на существенные и несущественные. Основой разделения может быть прошлый опыт, экспертная оценка или специальные расчеты на модели линейного программирования. Несущественные параметры в дальнейших расчетах представляются средними значениями. Существенные параметры, задаваемые диапазоном значений, образуют выпуклое множество (при этом следует учитывать взаимозависимость существенных параметров в соответствии со спецификой задачи). Для дальнейших расчетов вместо непрерывного множества отбирается совокупность вершин выпуклого множества существенных параметров.

3-й этап. Для каждой вершины c_i решается следующая задача на модели линейного про-

граммирования при ограничениях (1): минимизируется линейный функционал $c_i x$. Цель этапа — найти числа $z_i = \min_x c_i x$.

4-й этап. В соответствии с табл. 1 [11] формируются и решаются специальные задачи линейного программирования. Цель этапа — найти набор оптимальной в условиях неопределенности стратегии развития.

5-й этап. Анализируются найденные оптимальные стратегии с учетом конкретного содержания решаемой задачи. Цель этапа — сузить, насколько это возможно, рекомендуемую стратегию.

Пример расчета. Рассчитывалась структура ядерной энергетики на 50 лет. Было изучено влияние неопределенности удельных капиталовложений в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами и стоимости добычи природного урана. Каждый из них первоначально был определен диапазоном возможных значений «от — до», в совокупности образующих выпуклый многогранник. В соответствии с применяемым методом многогранник был заменен набором крайних точек. Каждая крайняя точка, называемая условно состоянием среды, характеризуется тремя числами: K_b , K_t — капиталовложения в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами, $C_{пр}$ — стоимость добычи природного урана. Характеристика вершин множества D , образовавших расчетный набор состояний среды, приведена в табл. 2 (черта вверху означает, что взято максимальное, черта внизу — минимальное значение).

Рассмотрены быстрые реакторы-размножители, быстрые реакторы-конвертеры, тепловые

Параметры специальных линейных задач при учете фактора неопределенности

Таблица 1

Критерий	Формула критерия	Линейные функционалы	Ограничения	Число линейных задач / число ограничений
Средние затраты (Лаплас)	$(1/S) \sum_{i=1}^S (c_i, x)$	$(1/S) \min \left(\sum_{i=1}^S c_i, x \right)$	$Ax = b; x \geq 0$	$1/m$
Максимальные затраты (Вальд)	$\max_{i=1, \dots, S} (c_i, x)$	$\min y$	$Ax = b; y \geq (c_i, x);$ $i = 1, 2, \dots, S;$ $x \geq 0; y \geq 0$	$1/m + S$
Максимальный риск (Севидж)	$\max [(c_i, x) - z_i]; z_i = \min (c_i x)$ $x: Ax = b$	$\min y$	$Ax = b; y \geq (c_i, x) - z_i;$ $i = 1, 2, \dots, S;$ $x \geq 0; y \geq 0$	$S + 1/m + S$
Взвешенные при заданном a затраты (Гурвиц)	$a \min_i (c_i, x) + (1-a) \times \max_i (c_i, x)$	$\min_i \tilde{K}; \tilde{K} = \min [(ac_i, x) + (1-a)y];$ $i = 1, 2, \dots, S$	$Ax = b; (c_i, x) \leq (c_j, x);$ $j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, S;$ $y \geq (c_k, x); k = 1, 2, \dots, S; x \geq 0;$ $y \geq 0$	$S/m + 2S - 1$

Варианты состояний среды — вершины множества D

Таблица 2

Состояние	Показатель	Ввод АЭС				Показатель	Относительная стоимость добычи природного урана по категориям		
		1986—1990 гг.	1991—1995 гг.	1996—2005 гг.	после 2005 г.		1	2	3
1.1	\bar{K}_B	—	440	330	265	$\bar{C}_{пр}$	1	1,76	2,4
	\bar{K}_T	325	325	270	245				
1.2	\bar{K}_B	—	440	330	265	$\underline{C}_{пр}$	0,75	1,32	2,4
	\bar{K}_T	325	325	270	245				
1.3	\bar{K}_B	—	440	330	265	$\bar{C}_{пр}$	1	1,76	2,4
	\underline{K}_T	265	265	220	190				
1.4	\bar{K}_B	—	440	330	265	$\underline{C}_{пр}$	0,75	1,32	2,4
	\underline{K}_T	265	265	220	190				
1.5	\bar{K}_B	—	355	315	235	$\bar{C}_{пр}$	1	1,76	2,4
	\bar{K}_T	325	325	270	220				
1.6	\bar{K}_B	—	355	315	235	$\underline{C}_{пр}$	0,75	1,32	2,4
	\bar{K}_T	325	325	270	220				
1.7	\bar{K}_B	—	355	265	215	$\bar{C}_{пр}$	1	1,76	2,4
	\underline{K}_T	265	265	220	190				
1.8	\bar{K}_B	—	355	265	215	$\underline{C}_{пр}$	0,75	1,32	2,4
	\underline{K}_T	265	265	220	190				

реакторы на обогащенном уране и тепловые реакторы, которые в середине первого десятилетия XXI в. переводятся на плутониевое топливо. Реакторы-конвертеры только в течение первых трех лет перегружаются ураном, затем переводятся в режим размножения. Гипотеза о рациональности режима перегрузки таких реакторов была подтверждена в [9]. Предполагалось, что быстрые реакторы будут освоены к началу 90-х гг. и в это же время могут широко внедряться в энергетику (в модели понятия возможности и целесообразности различаются: оптимальное время ввода в широких масштабах реакторов-размножителей определяется на модели, т. е. является эндогенной переменной). При задании характеристик реакторов учитывались возможные усовершенствования технологии. В качестве тепловых рассматривались легководные реакторы.

Каждой вершине множества присвоен номер, для чего применяются обозначения: 1.1, 1.2, 1.3, ..., 1.8. Назовем вершины множества D также крайними состояниями.

Наряду с рассматриваемым точным методом оптимизации в условиях неопределенности возможны другие, менее точные методы определе-

ния оптимальной стратегии. В соответствии с более простым, менее точным, но получившим уже распространение методом (см., например, [12]) оптимальные стратегии определяются из числа стратегий, найденных на модели линейного программирования, т. е. из числа стратегий третьего этапа. В данной работе этот приближенный метод был использован для того, чтобы получить ответ на вопрос, в какой мере оправдано применение более точного метода. Приближенный метод можно назвать методом первого приближения, а полученную с его помощью стратегию — оптимальной в перво приближении.

Для различения стратегий первого приближения применяли соответствующие обозначения тех крайних состояний, при которых были определены данные стратегии, при этом обозначение стратегии заключалось в кавычки. Например, «1.1» обозначает стратегию, найденную при оптимизации модели линейного программирования в предположении, что реализуется крайнее состояние 1.1. Аналогично стратегия, оптимальная в модели линейного программирования при крайнем состоянии 1.2, обозначается «1.2». В соответствии с этим определено

восемь таких стратегий: «1.1», «1.2», . . . , «1.8». Для каждой из них вычислялись четыре характерных значения: максимальные затраты и риск, средние и средневзвешенные затраты. Затем по четырем принятым критериям в условиях неопределенности выбирались оптимальные стратегии развития в первом приближении. Выполненные расчеты и последующий анализ стратегии «1.1», «1.2», . . . , «1.8» показал, что все они имеют следующие основные свойства:

быстрые реакторы присутствуют во всех оптимальных структурах ядерной энергетики на расчетный период;

с некоторого характерного для каждой стратегии периода быстрые реакторы начинают вытеснять тепловые;

с начала XXI в. тепловые реакторы постепенно переводятся на плутониевое топливо; принятое в расчетах повышение стоимости добычи природного урана — более существенный фактор по сравнению с неопределенностью стоимости добычи внутри категорий; последняя неопределенность не оказывала длительного влияния на структуру АЭС;

соотношение капиталовложений в АЭС с быстрыми и тепловыми реакторами α оказывает значительное влияние на решение об оптимальном сроке начала широкого строительства быстрых реакторов.

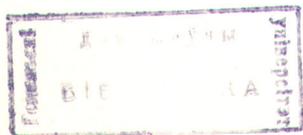
При минимальных E (состояния 1.5 и 1.6), т. е. в условиях, экономически наиболее благоприятных для развития реакторов-размножителей, быстрые реакторы оптимально должны были быть введены уже в начале 90-х гг., их доля к концу века составила бы около 30%. Эти данные близки к результатам, которые были бы получены при оптимизации структуры ядерной энергетики по критерию минимума потребности в природном уране. Доля тепловых реакторов на обогащенном уране уменьшилась бы к 1995 г. до 35%, к концу века до 7%, но возросла бы доля тепловых реакторов на плутониевом топливе. В начале 90-х гг. их было бы 30%, к концу века — 50%. К началу 20-х гг. XXI в. их доля уменьшается до 15%. Различия в стоимости природного урана по первым двум категориям ресурсов в этих состояниях не оказывают влияния на структуру ядерной энергетики.

При наименее благоприятных условиях (состояния 1.3 и 1.4) реакторы-размножители должны оптимально вводиться только в конце первого десятилетия XXI в., когда α окажется на уровне 1.4. Понятно, что при таком позднем внедрении быстрые реакторы не могут оказы-

вать существенного влияния на структуру ядерной энергетики до конца первого десятилетия XXI в. Промежуточные структуры будут развиваться при крайних состояниях 1.1, 1.2, 1.7 и 1.8. Для этих всех вариантов оптимальное время начала широкого строительства — середина 90-х гг. К концу века их доля быстро возрастает. Из приведенных данных следует, что, например, такой первостепенной важности вопрос, когда начинать широкое строительство быстрых реакторов, нельзя решить простым многовариантным расчетом без использования критериев принятия решений с учетом неопределенности.

Результаты расчетов по двум методам (точно и первого приближения) приведены в табл. 3. Она представляет матрицу, разделенную на четыре квадранта. Каждый элемент таблицы, расположенный в двух левых квадрантах, — приведенные суммарные затраты (в денежных единицах) на развитие системы АЭС в прогнозируемом периоде для стратегии, обозначение которой приводится в строке слева, при состоянии среды, указанном в столбце сверху. Так, в левом верхнем углу таблицы стоит число 85,8 (подчеркнуто). Оно указывает, что стратегия первого приближения «1.1» потребует затрат в 85,8 денежных единиц, если K_6 , K_7 и $C_{пр}$ окажутся соответствующими состоянию среды 1.1 (см. табл. 2). Аналогично справа от указанного значения число 85,0 указывает на затраты стратегии «1.1» при состоянии среды 1.2 и т. п. Таким образом, в верхней половине таблицы расположены данные, полученные по методу первого приближения, в нижней — определенные по разработанному точно методу. Так, стратегия под названием «Лаплас» получена по этому последнему методу при оптимизации системы по критерию Лапласа. Аналогично определяются стратегия «Севидж», «Вальд», «Гурвиц». Левый нижний квадрант содержит данные, позволяющие сопоставлять затраты каждой стратегии при различных крайних состояниях.

В правой части таблицы (столбцы: критерии Вальда, Лапласа, Гурвица, Севиджа) приводятся затраты и риск в соответствии со смыслом критерия, указанного в названии столбца. Например, на пересечении строки «1.2» и столбца Лаплас число указывает, что средние по всем возможным состояниям среды затраты для стратегии «1.2» равны 79,5 денежных единиц, число на пересечении строки «Гурвиц» и столбца Севидж показывает, что максимальный риск стратегии «Гурвиц» составляет 2,4 денежных



Матрица затрат и критериальных значений

Стратегия	Затраты								Численное значение критерия			
	1.2	1.2	1.3	Состояние среды		1.6	1.7	1.8	Вальда	Лапласа	Гурвица	Севиджа
				1.4	1.5							
Оптимальная по методу первого приближения:												
«1.1»	85,8	85,0	79,7	78,8	82,3	81,3	72,0	72,5	85,8	79,5	73,9	2,6
«1.2»	86,1	84,8	79,5	78,5	82,3	81,3	72,2	71,0	86,1	79,5	74,1	2,4
«1.3»	88,4	86,9	77,6	76,1	85,7	84,1	75,1	73,5	88,4	81,0	76,4	4,4
«1.4»	88,4	86,9	77,6	76,1	85,7	84,1	75,1	73,5	88,4	81,0	76,4	4,4
«1.5»	86,9	86,0	81,9	81,0	81,7	80,9	72,6	71,7	86,9	80,4	74,8	4,9
«1.6»	87,0	86,0	81,9	81,0	81,7	80,9	72,6	71,7	87,0	80,4	74,8	4,9
«1.7»	85,8	85,0	79,8	78,8	82,3	81,3	72,0	71,0	85,8	79,5	73,9	2,6
«1.8»	86,0	85,0	79,5	78,5	82,3	81,3	72,0	71,0	86,0	79,5	73,9	2,4
Оптимальная по точному методу учета неопределенности:												
«Вальд»	85,8	85,0	79,7	78,8	82,3	81,3	72,0	71,0	85,8	79,5	73,9	2,6
«Лаплас»	86,0	85,0	79,2	78,2	82,6	81,6	72,0	71,0	86,0	79,4	73,9	2,1
«Гурвиц»	86,0	85,0	79,5	78,5	82,5	81,4	72,0	71,0	86,0	79,5	73,9	2,4
«Севидж»	86,1	85,0	78,6	77,3	83,2	81,9	72,6	71,4	86,1	79,5	74,4	1,5

единиц. Аналогично расшифровываются остальные данные таблицы.

Сопоставим стратегии первого приближения. Наилучшими среди них по критерию Вальда являются стратегии «1.1» и «1.7», для которых максимальные затраты равны 85,8. Равенство этих показателей означает, что по критерию Вальда стратегии «1.1» и «1.7» равноэкономичны. Продолжая этот анализ для остальных критериев, обнаруживаем, что по критерию Лапласа равноэкономичными стратегиями являются «1.1», «1.2», «1.7», «1.8», по критерию Гурвица — «1.1», «1.7», «1.8», по критерию Севиджа — «1.2» и «1.8». Из этого следует вывод: среди стратегий первого приближения нет какой-то одной, абсолютно лучшей по сравнению с другими по всем критериям оптимальности в условиях неопределенности. Стратегия «1.2» оптимальна по двум критериям, стратегии «1.1», «1.7», «1.8» — по трем, при этом стратегия «1.2» по совокупности критериев хуже «1.8». Поэтому в рамках первого приближения в качестве оптимальных в условиях неопределенности оставляем три: «1.1», «1.7», «1.8». Сравнение соответствующих структур по результатам расчетов показывает, что они мало различаются. Их характерные общие показатели следующие: оптимальное время ввода реакторов-размножителей — середина 90-х гг., их доля в структуре

ядерной энергетики конца 90-х гг. — около 25%, в середине первого десятилетия XXI в. — около 40%.

Сравним теперь по данным правого нижнего квадранта табл. 3 стратегии «Вальд», «Лаплас», «Гурвиц» и «Севидж». Из дальнейшего рассмотрения можно исключить стратегию «Гурвиц», поскольку она имеет худшие показатели при сравнении со стратегией «Лаплас» по всем критериям. Если подходить строго формально, то оставшиеся три стратегии («Вальд», «Лаплас», «Севидж») нельзя распределить по степени предпочтительности. Однако такой формальный подход представляется чрезмерно догматическим и анализ стратегий можно продвинуть несколько дальше. В самом деле, сравним «Вальд» и «Лаплас». По критерию Гурвица они одинаковы, по критерию Лапласа вторая стратегия несколько лучше (около 0,13%), по критерию Вальда уступает первой (около 0,23%), но по критерию Севиджа значительно превосходит «Вальд» — на 19%. Ввиду этого для дальнейшего рассмотрения можно оставить только две стратегии: «Лаплас» и «Севидж». Они примерно одинаковы по критериям Вальда и Лапласа, хотя первая стратегия и чуть лучше (около 0,1%), и различны по критериям Гурвица и Севиджа. Разница по критерию Гурвица — в пользу стратегии «Лаплас» и составляет около 0,7%,

но максимальное значение риска больше, чем в стратегии «Севидж», на 60%. Это различие делает стратегию «Севидж», по-видимому, более предпочтительной (табл. 4). Приведем дополнительные соображения в пользу стратегии «Севидж», для чего сравним показатели при различных крайних состояниях (левый нижний квадрант табл. 3). Анализ показывает, что стратегия «Лаплас» при благоприятных для развития быстрых реакторов состояниях 1.5, 1.6, 1.7, 1.8 экономической стратегии «Севидж». Однако при неблагоприятных условиях в состояниях 1.3 и 1.4, которые в настоящее время кажутся более вероятными, уступает последней. Таким образом, оптимальной в рамках данной модели и применяемого метода можно считать стратегию «Севидж». Сравнение со стратегиями первого приближения показывает, что решения и рекомендации, принятые в соответствии с их основными структурными характеристиками, будут существенно различаться. Это вполне оправдывает сравнительно небольшие дополнительные затраты, связанные с применением более сложного, но более точного метода оптимизации в условиях неопределенности.

Решение задач второго типа. В случае, если существенная неопределенность имеется не только в векторе s , но также в остальных экзогенных параметрах модели, рассмотренный метод не годится. Следует подойти к постановке задачи с несколько иных позиций. Заметим, что, хотя модель ядерной энергетики, описываемая соотношениями (1), была динамической, собственно время не учитывалось. В действительности время неоднородно по отношению к задаче прогнозирования. В самом деле, хотя прогноз и охватывает 50 лет, с практической точки зрения интересны прежде всего решения, которые следует принимать в ближайшие к моменту прогнозирования отрезки времени. Но с течением времени могут иметь место новые решения и в момент прогноза не следует принимать решения на весь последующий период времени. Следовательно, в методе учета фактора неопределенности целесообразно учесть возможность принятия решений в будущем. Кроме того, необходимо учитывать, что любые решения принимаются в иерархически связанной системе и, следовательно, они должны быть приняты

Показатели структуры ядерной энергетики

Таблица 4

Стратегия	Оптимальное время ввода реакторов-размножителей, год	Доля реакторов-размножителей	
		Конец 90-х гг.	Начало XXI в.
«Севидж»	2001	—	40
«Лаплас»	1996	20	40

на своем иерархическом уровне. Метод, учитывающий эти требования и особенности динамики развития, был разработан и изложен в [11] и [13]. Дальнейшей задачей является его применение при прогнозировании развития ядерной энергетики.

Поступила в Редакцию 6.IV.78.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вирцер А. Д., Левенталь Г. Б., Чернавский С. Я. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 6, с. 955.
2. Доллежал Н. А. и др. Там же, 1971, т. 31, вып. 3, с. 187.
3. Деониги Д. Докл. S/SM-139/40 на Симпозиуме по оценке роли АЭС в энергосистемах. Вена, октябрь, 1970.
4. Франковский В. «Атомная энергия», 1969, т. 27, с. 369.
5. Боболович В. Н., Корякин Ю. И. Там же, 1972, т. 33, вып. 6, с. 961.
6. Браилов В. П. Там же, 1972, т. 32, вып. 5, с. 401.
7. Hafele W., Manne A. RR-74-7 IASAS, Laxenburg, Austria, 1974.
8. Манн А. «Атомная техника за рубежом», 1974, № 11, с. 20.
9. Боболович В. Н. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 4, с. 251.
10. Юдин Д. С. Математические методы управления в условиях неполной информации. М., «Советское радио», 1974.
11. Чернавский С. Я. В кн.: Фактор неопределенности при принятии решений в больших системах энергетики. Т. 2. Иркутск, 1974, с. 35.
12. Макаров А. А., Мелентьев Л. А. Методы исследования при оптимизации энергетического хозяйства. Новосибирск, «Наука», 1973.
13. Вирцер А. Д., Чернавский С. Я. В кн.: Труды конф. «Системный анализ и перспективное планирование». М., 1973, с. 209.