

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СЛОЖНЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. А. МАКАРОВ, А. С. МАКАРОВА, А. Н. ЗЕЙЛИГЕР

(Иркутск, Ленинград)

В настоящее время в исследовании и оптимизации сложных экономических систем (народного хозяйства в целом, его территориальных и отраслевых подсистем) преобладает детерминистический подход. Предполагая однозначность всех категорий исходных данных, он игнорирует двойственность природы [1] сложных экономических систем, которые, с одной стороны, развиваются под действием объективных закономерностей и в этом смысле действительно являются детерминированными; с другой, эти системы осуществляют свое закономерное развитие лишь в виде тенденции, постоянно нарушаемой влиянием случайных факторов, т. е. обладают вероятностными свойствами в смысле невозможности однозначного предсказания их последующего развития.

Абстрагирование от вероятностных свойств экономических систем вызывает такие крайности детерминистического подхода, как стремление к полной формализации процесса оптимального планирования, к построению максимально подробных математических моделей и получению на них единственного, предельно точного оптимального решения. Все это чревато опасностью формирования неправильных концепций оптимального управления и планирования экономических систем и искаженных представлений о рациональных направлениях их развития.

Для устранения этой опасности, очевидно, необходимо выполнить практические исследования вероятностных свойств ряда сложных экономических систем. В данной статье излагается один из возможных методов и предварительные результаты такого исследования применительно к задачам перспективного планирования топливно-энергетического хозяйства страны и некоторых его подсистем.

Вероятностные свойства экономических систем решающим образом зависят от того, насколько подробное вероятностное описание может быть получено для различных категорий исходных показателей. Как известно, определение вероятностных характеристик (вида закона распределения и его основных моментов — математического ожидания, дисперсии и т. п.) случайных величин требует статистической обработки результатов их массовой реализации в прошлом. Однако применительно к экономическим системам такая обработка в чистом виде может быть выполнена лишь для небольшой группы показателей, колебания которых определяются преимущественно действием климатических факторов (например, расход тепла на отопление). Для большинства же показателей прошлый опыт либо вообще отсутствует, либо имеются сомнения в правомерности его распространения на последующее развитие системы, т. е. в допустимости использования соответствующих статистических характеристик для вероятностного описа-

ния этих показателей в будущем. Это относится к показателям стоимости и размеров добычи природных ресурсов на прогнозных месторождениях (например, нефти и газа), затрат на создание индивидуальных объектов (например, ГЭС) или новой техники (атомные электростанции) и т. п. Такие показатели по сути своей являются *неопределенными*, т. е. для них может быть найдена лишь приближенная оценка верхнего и нижнего значений случайной величины и в лучшем случае указан интервал ее наиболее вероятных значений (например, капиталовложения в данную ГЭС не могут быть ниже 120 руб/квт и, по-видимому, не превысят 190 руб/квт; наиболее же вероятная их величина 130—140 руб/квт).

Ввиду отсутствия сколько-нибудь полного вероятностного описания большинства используемых показателей, экономические системы должны оптимизироваться как вероятностно-неопределенные системы. В сочетании со свойством «пологости» функционала (т. е. наличием большого числа различных способов развития экономических систем, которые по значению функционала мало отличаются от оптимального варианта [1]) это обуславливает объективное существование *зоны неопределенности оптимального развития* сложной экономической системы, т. е. *совокупности вариантов ее развития, каждый из которых является оптимальным при каких-либо реально возможных сочетаниях внешних условий*. Вследствие этого задачей оптимизации перспективного развития экономической системы является не определение одного оптимального решения, а выявление и всесторонняя экономическая оценка всей совокупности оптимальных вариантов, образующих зону неопределенности ее оптимального развития.

1. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагаемый метод количественного исследования зоны неопределенности основан на использовании существующих детерминированных моделей экономических систем, сводящихся к общей задаче линейного программирования*. Он предусматривает имитацию на ЭВМ множества возможных условий развития экономической системы. Это достигается изменением значений коэффициентов функционала и вектора ограничений модели, т. е. экономических и натуральных показателей системы (технологические показатели, т. е. коэффициенты матрицы линейной модели, на данном этапе исследований принимаются однозначными). Различные сочетания значений этих показателей имитируют колебания внешних условий, а решения, полученные на модели для каждого сочетания, характеризуют возможные оптимальные способы развития системы и в своей совокупности — зону ее неопределенности.

Этот подход, очевидный по своей идее, весьма сложен в практической реализации. Во-первых, он требует формирования достаточно представительного множества сочетаний условий развития системы. Во-вторых, для всех таких сочетаний необходимо найти оптимальные способы ее развития и на основе их анализа выявить совокупность оптимальных вариантов, образующих зону неопределенности. В-третьих, требуется дать экономическую оценку выявленных вариантов при различных условиях развития системы.

Ниже последовательно рассматриваются указанные этапы исследования зоны неопределенности перспективного развития сложных экономических систем.

* Рассматриваемый подход к исследованию зоны неопределенности в принципе не зависит от типа используемых детерминированных моделей. В настоящее время он реализуется на нелинейных моделях для оптимизации режима в энергосистемах и в дискретно-нелинейных моделях схем теплоснабжения городов.

1. Для выявления зоны неопределенности прежде всего необходимо сформировать представительное множество сочетаний условий развития системы, которые учитывали бы как индивидуальные интервалы колебания и возможные законы распределения нескольких тысяч исходных показателей, так и корреляционные связи, характеризующие взаимозависимость их случайных изменений. Для этих целей могут использоваться различные подходы.

Во-первых, возможные сочетания условий развития системы могут называться «вручную» (как это делается в настоящее время при вариантных расчетах) на основе представлений ведущих специалистов о взаимосвязи и возможных значениях основных показателей развития системы. При всей своей ненадежности этот способ позволяет приближенно отразить корреляционные взаимосвязи между основными народнохозяйственными показателями*.

Во-вторых, использование метода статистических испытаний (Монте-Карло). Не обладая отмеченным преимуществом первого подхода, этот устраняет большинство его недостатков, позволяя автоматически сформировать очень большую совокупность сочетаний условий развития системы на основе весьма приближенных представлений о характере случайных колебаний различных компонент исходных данных.

Нами используется комбинация рассмотренных подходов: вначале «вручную» назначаются основные альтернативы условий развития системы, а затем для каждой из них методом Монте-Карло формируется большое число случайных сочетаний исходных данных. При этом учитываются: а) множественность случайных факторов, влияющих на изменение каждого исходного показателя (например, экономические показатели производства электроэнергии изменяются под действием по крайней мере трех независимых случайных факторов: затрат на топливо, на оборудование и на строительство электростанции); б) синхронность изменений некоторых случайных факторов (например, затрат на однотипное оборудование электростанций в различных районах страны), обуславливающая корреляционные взаимосвязи между отдельными компонентами исходных данных; в) индивидуальные характеристики «разброса» — коэффициент вариации (погрешность) и возможный вид закона распределения** — каждого влияющего фактора.

Описанные в [3] программы позволяют сформировать рассмотренным способом тысячи случайных сочетаний исходных данных, которые внутренне непротиворечивы и достаточно полно описывают возможные условия развития системы. После этого с помощью методов теории распознавания образов [4] эти сочетания «рассортировываются» по N группам, количество

* Например, темпы развития народного хозяйства оказывают влияние как на потребность в топливе, так и на возможные размеры прироста его добычи (через лимиты капиталовложений, средств производства и т. п.). Поэтому при уменьшении потребности народного хозяйства в топливе обычно уменьшается и возможный прирост добычи, что необходимо учитывать при исследовании зоны неопределенности топливно-энергетического хозяйства.

** Вид закона распределения может приниматься исходя из принципа максимума энтропии на основе имеющихся интуитивных представлений о вероятностных характеристиках случайной величины: если известен только интервал ее изменения, то принимается равномерный закон распределения; если к тому же удается оценить наиболее вероятное значение величины, то принимается нормальный закон или асимметричное β -распределение (в зависимости от расположения наиболее вероятного значения относительно середины интервала изменения величины) [2]. Однако все эти гипотезы о виде распределения не могут считаться достоверными и поэтому не снимают проблему неопределенности, а лишь дают удобный технический прием для ее исследования. На заключительном этапе анализа от этих гипотез удастся отказаться, причем, как показано ниже, это не отражается на основных результатах оптимизации систем в условиях неопределенности.

которых выбирается исходя из вычислительных возможностей ЭВМ (в наших расчетах обычно принималось $N = 100$). Центральные представители этих групп и рассматриваются далее как множество вероятных условий развития системы.

2. На следующем этапе исследования зоны неопределенности выявляются формирующие ее оптимальные варианты развития системы.

С этой целью на линейной детерминированной модели экономической системы находится оптимальное решение для каждого из N полученных на предыдущем этапе сочетаний исходных данных. При этом каждое решение отыскивается не новым полным расчетом модели, а с помощью алгоритмов корректировки исходного оптимального решения соответствующей задачи линейного программирования (полученного, например, при средних значениях исходных данных) при изменении коэффициентов ее функционала и вектора ограничений. В [3] изложены алгоритм и программа такой корректировки, позволяющие получить $N = 100$ оптимальных решений ценой лишь 6—10-кратного увеличения полного времени однократного расчета линейной модели.

Следующим шагом исследования является объединение в группы оптимальных решений, имеющих одинаковый набор и очередность развития основных объектов и лишь такие различия их производительности, которые не меняют вывода о целесообразности сооружения этих объектов. В результате такой группировки из полной совокупности N оптимальных решений выделяется гораздо меньшее количество ($R \ll N$) *вариантов развития системы* и приближенно оценивается вероятность каждого варианта оказаться оптимальным: $p_r \approx l_r / N$, где l_r — количество оптимальных решений, объединенных в варианте r .

Формирование оптимальных вариантов связано с большими трудностями, поскольку оно требует четкой оценки качественных и количественных различий в развитии системы.

Для учета качественных различий вводится деление параметров системы (т. е. переменных соответствующей математической модели) на существенные параметры, определение которых собственно и является задачей оптимизации данной системы (применительно к топливно-энергетическому хозяйству страны — размеры добычи и межрайонного распределения основных видов топлива): и на второстепенные параметры, которые учитываются лишь для того, чтобы правильно принять решение по существенным параметрам, и подлежат уточнению на последующих стадиях оптимизации (в нашем примере — размеры складов топлива и другие режимные характеристики).

Деление параметров системы на существенные и второстепенные требует широкого использования опыта специалистов и означает замену расплывчатой словесной формулировки целей оптимизации конкретным перечнем искомых параметров. Понятно, что к одному варианту развития системы должны относиться оптимальные решения с одинаковым набором существенных параметров (переменных).

Однако совпадение существенных параметров еще не является достаточным условием для формирования вариантов. Оптимальные решения могут иметь одинаковый состав существенных параметров, но такие количественные различия их значений (например, мощности электростанций), которые не позволяют считать их представителями одного и того же варианта развития системы. Для оценки существенности количественных различий качественно однородных решений нами используются методы теории распознавания образов [4]. С этой целью оптимальные решения интерпретируются как точки в m -мерном пространстве с координатами, определяемыми значениями каждой из m существенных переменных (параметров). После

Таблица 1

Состав вариантов зоны неопределенности оптимального развития некоторых экономических систем

Показатели	Топливо-энергетическое хозяйство (статическая модель)	Электроэнергетическая система района (динамическая модель)
Погрешность исходных данных, %	$\pm 10-12$	$\pm 10-13$
Количество оптимальных вариантов (R) при числе сочетаний внешних условий		
$N = 50$	16	14
$N = 100$	20	17
$N = 150$	20	17
Вероятность появления вариантов (при $N = 100$)		
№ 1	0,21	0,17
№ 2	0,17	0,13
№ 3	0,11	0,11
№ 4	0,08	0,10
Итого по группе вариантов № 1—4	0,57	0,51

нанесения всех N точек в m -мерном пространстве выделяются несколько областей их «сгущений» (групп), для которых расстояния между точками (решениями) внутри группы меньше расстояний между точками соседних групп «сгущений». Полученные таким образом группы характеризуют оптимальные варианты развития системы и в своей совокупности образуют зону неопределенности ее оптимального развития.

В табл. 1 приведены результаты определения состава вариантов, образующих зону неопределенности оптимального развития топливно-энергетического хозяйства страны и электроэнергетической системы одного из районов. Они свидетельствуют о существовании относительно небольшого числа оптимальных вариантов: для данных систем при погрешности исходных данных $\pm 10-13\%$ их количество составило $R_{\text{тэх}} = 20$ и $R_{\text{ээс}} = 17$. При этом характерно, что в обеих системах существует достаточно узкая группа из 4—5 вариантов, суммарная вероятность реализации которых превышает вероятность реализации остальных оптимальных вариантов, вместе взятых. По-видимому, это свидетельствует о большой устойчивости оптимального решения рассмотренных систем.

С вычислительной точки зрения существенным является вопрос о достаточном количестве рассмотренных сочетаний условий развития системы. Как видно из табл. 1, для обеих рассмотренных систем достаточным оказалось число испытаний $N = 100$, поскольку дальнейшее его увеличение не изменило количества выявленных оптимальных вариантов.

3. Необходимым этапом исследования зоны неопределенности является вычисление экономических характеристик найденных оптимальных вариантов развития системы.

Как известно, при детерминированном подходе экономической характеристикой вариантов является величина суммарных затрат, т. е. значение функционала Φ . Однако в условиях неопределенности использование этого показателя становится неудобным из-за несопоставимости его численных значений при различных сочетаниях условий развития системы. Действительно, в этих условиях большее значение Φ может свидетельствовать не о пониженной эффективности данного варианта, а лишь соответствовать повышенным значениям экономических показателей объектов или объемов производства продукции. Поэтому переход к оптимизации экономических систем в условиях неопределенности должен сопровождаться модификацией экономических характеристик вариантов.

Такой модифицированной характеристикой являются *показатели экономического риска*, характеризующие возможное увеличение затрат по варианту вследствие незнания будущих условий развития системы.

Существование этих показателей обусловлено тем, что каждый вариант развития системы является оптимальным лишь при определенных условиях, а во всех остальных случаях он дает некоторый перерасход затрат по сравнению с другими оптимальными вариантами. Если бы заранее были известны действительные условия развития системы, этот перерасход удалось бы устранить, выбрав соответствующий им оптимальный вариант. Однако для вероятностно-неопределенных систем это невозможно. Поэтому при реализации любого варианта всегда имеет место больший или меньший риск перерасхода затрат, поскольку действительные условия развития системы могут отличаться от условий, при которых принятый вариант является оптимальным.

Способ вычисления значений экономического риска меняется в зависимости от того, являются ли случайными величинами только экономические показатели (коэффициенты функционала модели) или натуральные показатели (ограничения), или те и другие вместе.

При случайном характере коэффициентов функционала величина экономического риска (λ_r^n) для варианта r в случае реализации сочетания исходных данных P^n составляет

$$\lambda_r^n = P^n X_r - P^n X_n = \Phi_r^n - \Phi_{опт}^n, \quad (1)$$

где X_r , X_n — варианты развития системы (набор и производительность объектов), являющиеся оптимальными при предполагавшихся и действительно сложившихся P^n экономических показателях объектов.

Если случайными показателями являются коэффициенты вектора ограничений, то величина экономического риска определяется выражением

$$\lambda_r^n = \varphi_r B^n - \varphi_n B^n = \Phi_r^n - \Phi_{опт}^n, \quad (2)$$

где φ_r , φ_n — цены оптимального плана при предполагавшихся и реализованных B^n значениях потребности народного хозяйства в продукции экономической системы и ограничений на используемые ею ресурсы.

Наконец, при совместном изменении экономических и натуральных показателей

$$\lambda_r^n = P^n U_r B^n - P^n U_n B^n = \Phi_r^n - \Phi_{опт}^n, \quad (3)$$

где U_r , U_n — обратная матрица оптимального базиса при предполагавшихся и реализованных значениях исходных данных.

Следует подчеркнуть, что исчисление экономического риска в соответствии с (1) — (3) справедливо лишь на этапе перспективного планирования экономических систем, когда случайные колебания потребности в продукции или ресурсов еще можно успеть компенсировать отказом от строительства намеченных или сооружаемых дополнительных *замыкающих* объектов (показатели которых и формируют значения цен оптимального плана φ). На более близких этапах планирования отклонения потребности и ресурсов от предполагаемых вызывают «замораживание» объектов или требуют экстренных мероприятий по их форсированию. Соответствующие затраты и должны использоваться в этих условиях для определения экономического риска. Наконец, при текущем функционировании системы непредвиденное увеличение потребности в ее продукции или уменьшение ресурсов зачастую не может компенсироваться в рамках данной системы и вызывает ущерб на других участках (например, ущерб от недоотпуска электроэнергии). Тогда величина экономического риска должна определяться с учетом этого ущерба.

По (1) — (3) для каждого варианта r определяется N значений экономического риска. В целом же зона неопределенности оптимального развития системы характеризуется прямоугольной матрицей значений экономического риска, столбцы которой относятся к рассмотренным случайным сочетаниям исходных данных, а строки — к полученным в результате исследова-

		Случайные сочетания условий развития системы						
		P_1	P_2	P_3	$\dots$	P_n	$\dots$	P_N
Оптимальные варианты развития системы	X_1	λ_1^1	λ_1^2	λ_1^3	$\dots$	λ_1^n	$\dots$	λ_1^N
	X_2	λ_2^1	λ_2^2	λ_2^3	$\dots$	λ_2^n	$\dots$	λ_2^N
	X_3	λ_3^1	λ_3^2	λ_3^3	$\dots$	λ_3^n	$\dots$	λ_3^N
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	X_r	λ_r^1	λ_r^2	λ_r^3	$\dots$	λ_r^n	$\dots$	λ_r^N
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	X_R	λ_R^1	λ_R^2	λ_R^3	$\dots$	λ_R^n	$\dots$	λ_R^N

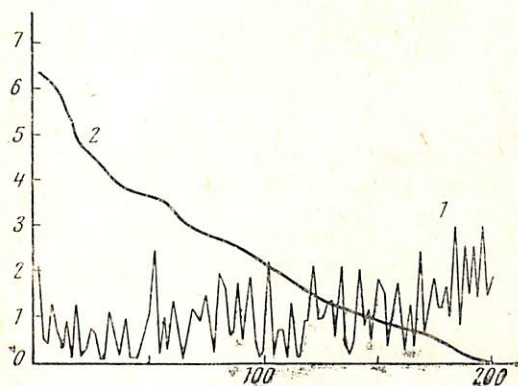


Рис. 1. Показатели экономического риска или перерасхода затрат от наличия погрешности исходных данных: значения экономического риска для двух оптимальных вариантов — строк матрицы (по оси ординат — значения экономического риска в процентах от оптимального функционала, по оси абсцисс — сочетания исходных данных): 1 — вариант № 1, 2 — вариант № 17

ния оптимальным вариантам развития системы (см. рис. 1). Эта матрица содержит принципиально новую информацию о поведении экономической системы в условиях неопределенности. Она представляет собой *обобщенную характеристику возможных экономических последствий незнания действительных условий развития системы* и является основой для сравнения вариантов в условиях неопределенности.

2. ВЫБОР ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Конечной целью планирования экономических систем является выбор наилучшего варианта их развития. Если бы имелись точные вероятностные характеристики исходных данных, то выбор наилучшего варианта был бы вполне однозначен и определялся бы критерием минимума математического ожидания затрат [5]

$$\Phi = \min_r \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Phi_r^n \right).$$

Однако принятые в начале исследования гипотезы о виде распределения случайных величин не вправе рассматриваться как достоверные. Поэтому окончательный выбор варианта развития системы должен вестись по правилам принятия решений в условиях неопределенности. При этом решающую роль играет критерий выбора.

Традиционный критерий минимума затрат позволяет выявить зону неопределенности оптимального развития системы. Для сравнения же вариантов в пределах этой зоны, как уже отмечалось, его целесообразно модифицировать в *критерий минимума экономического риска*. Однако каждый вариант характеризуется не одним, а совокупностью N значений экономического риска (см. рис. 1, где приведены значения экономического риска для двух вариантов развития системы, т. е. изображены две строки матрицы). Возникает вопрос, какой именно параметр кривой распределения значений экономического риска целесообразно принять в качестве критерия сравнения вариантов. В настоящее время имеется несколько мнений по этому вопросу [5].

В большинстве случаев лучшим можно считать вариант, имеющий *наименьшее среднее значение экономического риска*, т. е.

$$\lambda = \min_r \lambda_r = \min_r \frac{\sum_{n=1}^N \lambda_r^n}{N}. \quad (4)$$

Но для уникальных экономических систем (например, топливно-энергетическое хозяйство страны) важно застраховаться и от слишком больших перерасходов. Тогда для выбора варианта рекомендуется критерий *минимума максимального значения экономического риска*

$$\bar{\lambda} = \min_r \bar{\lambda} = \min_r \max_n \lambda_r^n. \quad (5)$$

Минимаксный критерий (5) ориентируется только на худшие условия развития системы, реализация которых обычно маловероятна. При этом не учитывается поведение системы в более благоприятных обстоятельствах. Этот недостаток частично устраняется при использовании для принятия решения так называемого «игрового» подхода. С этой целью матрица показателей экономического риска (см. табл. 2) интерпретируется в виде игры двух лиц с нулевой суммой и решается как задача линейного программирования

$$\min \left\{ \sum_{n=1}^N y_n \mid \sum_{n=1}^N \lambda_r^n y_n \geq 1; y_n \geq 0 \right\}. \quad (6)$$

В результате формируется новый вариант развития системы *, который имеет несколько большее значение среднего риска ($\bar{\lambda}$) по сравнению с критерием (4), но гарантирует меньший максимальный ущерб (v) по сравнению с минимаксным критерием (5), т. е.

$$\left(\bar{\lambda} = \sum_{r=1}^R \gamma_r \lambda_r\right) > (\lambda = \min_r \lambda_r) \text{ и } v < (\bar{v} = \min_r \lambda_r). \quad (7)$$

Однако и этот вариант не является идеальным решением, поскольку «игровой» подход предполагает активное противодействие со стороны вто-

Таблица 2

Распределение энергетических объектов по вероятности их реализации, %

Показатели	Топливо-энергетическое хозяйство страны	Электроэнергетическая система района
Погрешность исходных данных	$\pm 10-12$	$\pm 10-13$
Объекты с достоверной реализацией	47	27
Объекты с вероятностью реализации больше 0 и меньше 1, в том числе с вероятностью до 0,1	18	33
от 0,1 до 0,9	3	—
свыше 0,9	13	20
Нереализуемые объекты	2	13
	35	40

рого «игрока» — внешних условий развития системы; в действительности же такая гипотеза неправомерна.

Таким образом, ни один из рассмотренных критериев не свободен от условностей и не может безоговорочно применяться при оптимизации экономических систем. Вместе с тем экспериментальные исследования зоны неопределенности топливно-энергетического хозяйства страны и некоторых его подсистем выявили достаточно тесную взаимосвязь между этими критериями. Из рис. 2 видно, что среднее и максимальное значения экономического риска в исследуемой системе изменяются взаимосвязанно, т. е. вариантам с меньшими величинами среднего риска обычно соответствуют меньшие значения максимального риска, и наоборот. Эта зависимость проявляется только в виде тенденции (т. е. для любой пары вариантов может и не выполняться), но тем отчетливее, чем больше число рассмотренных сочетаний исходных данных N.

Наличие указанной зависимости позволяет надеяться на непротиворечивость рассмотренных критериев принятия решения по развитию экономических систем в условиях неопределенности. Иными словами, вариант, оптимальный по одному из критериев, близок к минимуму и по другим критериям. Так, в нашем примере вариант № 1 на рис. 2 имеет наименьшее значение среднего риска и почти не уступает варианту № 2 по минимаксному критерию ($\bar{\lambda}_1 = 3,3\%$, $\lambda_2 = 2,9\%$); одновременно оба варианта с большими весами ($\gamma_1 = 0,50$, $\gamma_2 = 0,12$) участвуют в формировании «смешанного» варианта при «игровом» подходе.

Выявленная в результате исследования топливно-энергетического хозяйства и некоторых его подсистем непротиворечивость различных критериев принятия решения в условиях неопределенности позволяет говорить

* Этот вариант вычисляется как $X_{cm} = \sum_{r=1}^R \gamma_r X_r$, где γ — компоненты вектора оптимального двойственного решения задачи (6).

о существовании группы *равноэкономичных вариантов*, развития экономических систем, неразличимых с точки зрения имеющихся экономических критериев. Представляется, что равноэкономичными можно считать те варианты из состава зоны неопределенности, у которых значения среднего риска λ_r не превышают его величины в «смешанном» $\tilde{\lambda}$ или минимаксном λ^* вариантах

$$\lambda_r \leq \max \{\tilde{\lambda}, \lambda^*\}. \quad (8)$$

На рис. 2 равноэкономичными являются первые пять вариантов.

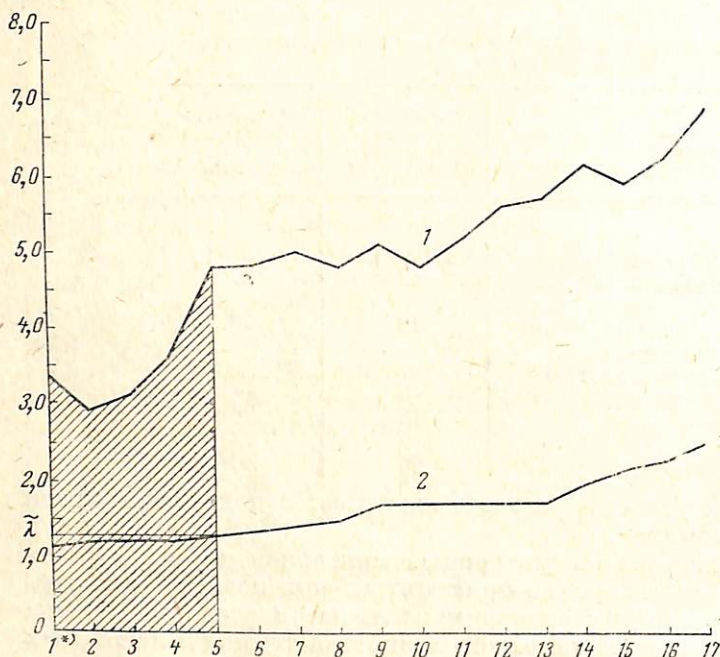


Рис. 2. Характер изменения показателей экономического риска по вариантам оптимального развития системы (по оси ординат — значения экономического риска в процентах от оптимального функционала, по оси абсцисс — оптимальные варианты. Звездочкой помечен вариант, оптимальный при средних значениях исходных данных): 1 — максимальные значения экономического риска (λ_r); 2 — средние значения экономического риска (λ_r)

Наличие в пределах зоны неопределенности гораздо более узкой группы равноэкономичных вариантов свидетельствует об эффективности исследования зоны неопределенности, поскольку оно *позволяет существенно снизить неопределенность выбора* реализуемого варианта развития системы. Действительно, из 17 вариантов, образующих зону неопределенности оптимального развития рассмотренной системы, равноэкономичными являются только 5 вариантов.

С другой стороны, наличие равноэкономичных вариантов обуславливает *принципиальную невозможность полной формализации процесса оптимального планирования сложных экономических систем*. «Нечувствительность» формальных критериев сравнения равноэкономичных вариантов требует привлечения для принятия окончательного решения дополнительных, не учтенных при оптимизации системы, экономических факторов (минимум расхода лимитированных ресурсов, максимум производительности труда, надежности и т. п.), а также социальных и политических соображений. Таким образом, принятие решения по развитию экономических систем неизбежно является *волевым актом* в том смысле, что окончательный выбор реализуемого варианта не может быть формализован и должен производиться с широким использованием опыта специалистов. Но это не означает проявления волюнтаризма, если «волевое» решение принимается в рамках найденного состава равноэкономичных вариантов после тщательного и всестороннего анализа его экономических и других последствий.

Наиболее слабым звеном исследования зоны неопределенности и принятия окончательного решения по развитию системы является неизбежная на современном этапе приближенность оценки вероятностных характеристик исходных данных. Для выяснения их влияния на результаты оптимизации выполнено исследование зоны неопределенности при изменении вида закона распределения и величины погрешности исходных данных (см. рис. 3).

Применение различных гипотез о виде закона распределения исходных данных — равномерное, нормальное и асимметричное β -распределение —

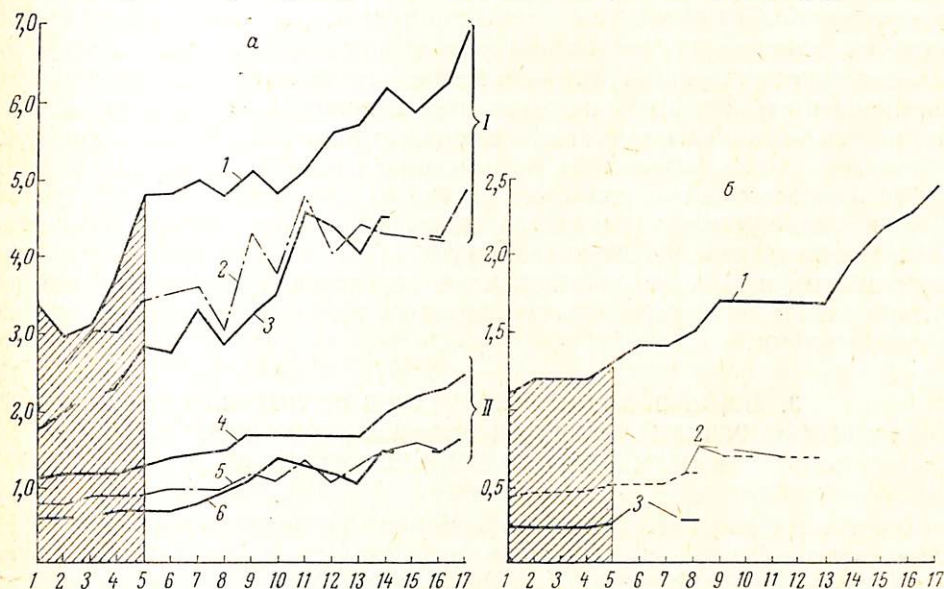


Рис. 3. Влияние вероятностной характеристики исходных данных на результаты оптимизации системы (по оси ординат — значения показателей экономического риска в процентах от оптимального варианта, по оси абсцисс — номер оптимального варианта): а — значения экономического риска при различных законах распределения исходных данных ($\delta = 12-13\%$): I — максимальное значение экономического риска (λ_r): 1 — равномерный, 2 — асимметричный, 3 — нормальный; II — среднее значение экономического риска (λ_r): 4 — равномерный, 5 — асимметричный, 6 — нормальный; б — значения среднего экономического риска при изменении погрешности исходных данных (для равномерного закона): 1 — $\delta = 12-13\%$, 2 — $\delta = 6-7\%$, 3 — $\delta = 3-4\%$

фактически не отразилось на размерах зоны неопределенности: при двух законах выявлен одинаковый состав вариантов ($R = 17$) и только при нормальном распределении «утерян» один вариант. Более того, значения среднего и максимального экономического риска при трех законах хотя и различаются по абсолютной величине, но изменяются от варианта к варианту взаимосвязанно (см. рис. 3, а). Поэтому можно предварительно считать, что изменение вида закона распределения исходных данных не оказывает существенного влияния на основной результат оптимизации экономической системы — состав равноэкономичных вариантов ее развития.

Несколько иное влияние на результаты оптимизации оказывает изменение погрешности исходных данных. При ее увеличении быстро возрастает количество оптимальных вариантов развития системы (см. рис. 3, б). Значения среднего и максимального экономического риска также возрастают, но при этом обычно не нарушается последовательность вариантов с точки зрения рассмотренных критериев принятия решения (рис. 3, б). Вследствие этого состав равноэкономичных вариантов развития системы

удается правильно выявить при погрешности исходных данных, значительно меньшей ее действительной величины (в рассмотренном примере уже при погрешности $\pm 3-4\%$).

Следует подчеркнуть, что вывод о слабом влиянии погрешности исходных данных на результаты оптимизации системы справедлив лишь в случае надежного знания средних значений (математических ожиданий) исходных данных. Изменение же средних значений при постоянной погрешности в виде распределения исходных данных обычно вызывает существенную деформацию как самой зоны неопределенности, так и состава равноэкономичных вариантов. Это обстоятельство в сочетании с выводом о слабом влиянии на результаты оптимизации вида закона распределения позволяет утверждать, что основной задачей подготовки исходной информации в вероятностном виде является *обоснованное определение границ интервала изменения соответствующих показателей*. При этом следует учитывать, что на результатах оптимизации неблагоприятно сказывается как необоснованное сужение этого интервала (за исключением случаев, когда надежно известно среднее значение соответствующей величины), так и его неоправданное расширение. Первое вызывает «потерю» некоторых оптимальных и даже равноэкономичных вариантов, а второе увеличивает неопределенность выбора окончательного решения по оптимальному развитию системы.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учет погрешности исходной информации при оптимизации экономических систем обычно осуществляется посредством многовариантных расчетов (при нескольких заранее намеченных сочетаниях исходных данных) и экономико-математического анализа области устойчивости полученных оптимальных решений. Следует подчеркнуть, что выполненные *исследования подтвердили допустимость такого подхода*. Получаемые этим способом оптимальные решения, несомненно, соответствуют некоторым вариантам из состава зоны неопределенности развития системы. Более того, во всех выполненных расчетах детерминированное решение, получаемое при средних значениях (математических ожиданиях) исходных данных, оказывалось в числе равноэкономичных вариантов* (см. рис. 2). Однако вариантный подход, по нашему мнению, правомерен лишь для относительно простых экономических систем. Тогда действительно можно «вручную» наметить наиболее интересные и принципиально различные сочетания исходных данных для получения вариантов решения. Кроме того, математические модели таких систем, как правило, относительно просты и не требуют больших затрат труда для проведения многовариантных расчетов.

Для сложных же экономических систем (типа топливно-энергетического хозяйства страны) большие народнохозяйственные затраты на их развитие обуславливают необходимость тщательного отбора вариантов, т. е. исследования всей зоны неопределенности. Кроме того, сложность и трудоемкость математических моделей этих систем в сочетании с большой неустойчивостью исходной информации вызывают систематическое «старение» результатов вариантных расчетов (например, данные о потребности и ресурсах топлива меняются по несколько раз в год, в то время как процесс оптимизации топливно-энергетического баланса страны занимает около по-

* Это правило может быть нарушено в случае вычисления экономического риска не по выражениям (1) — (3), а с использованием показателей народнохозяйственного ущерба.

лугодия). Исследование зоны неопределенности позволяет преодолеть этот недостаток за счет применения значительно *более гибкой схемы оптимального планирования сложных экономических систем*.

Эта схема предусматривает не только обоснованный *выбор* реализуемого варианта на начальном этапе планирования, но и постоянную его корректировку во времени по мере уточнения исходных данных. Для этого не требуется каждый раз оптимизировать систему заново, поскольку при исследовании зоны неопределенности наряду с составом вариантов определяются и те сочетания исходных данных, при которых каждый вариант является оптимальным. Поэтому при изменении внешних условий достаточно выделить из состава зоны неопределенности тот вариант развития системы, который является оптимальным при уточненных значениях исходных данных, и по возможности приблизить к нему реализуемый вариант путем корректировки состава и производительности объектов (предприятий).

Такая корректировка производится на основе данных *«подобъектного»* анализа результатов исследования зоны неопределенности. Его сущность заключается в оценке стабильности участия каждого объекта j в оптимальном плане. Для этого из общего числа оптимальных решений N , найденных при исследовании зоны неопределенности, выделяются решения, содержащие данный объект. Отношение количества таких решений n_j к общему числу оптимальных решений N приблизительно характеризует искомую вероятность $p_j = n_j / N$.

По p_j все рассматриваемые объекты подразделяются на достоверно реализуемые $p_j \approx 1$, заведомо нереализуемые $p_j \approx 0$ и «сомнительные» $0 < p_j < 1$ объекты (табл. 2). Последние можно объединить в цепочки взаимозаменяемости, представляющие собой замкнутые группы конкурирующих между собой объектов.

Знание цепочек взаимозаменяемости открывает возможность без специальных расчетов определять производительность одних «сомнительных» объектов по заданной производительности других. Это и позволяет корректировать ранее выбранный вариант применительно к новым условиям развития системы. Такая корректировка может производиться многократно — до появления новых способов развития системы или выхода реальных значений исходных данных за пределы ранее принимавшихся интервалов. При нарушении этих условий исследование зоны неопределенности должно проводиться заново.

Таким образом, исследование зоны неопределенности позволяет осуществлять постоянную корректировку плана по результатам периодически выполняемых оптимизационных расчетов. Тем самым появляется возможность *устранения объективного противоречия между непрерывностью процесса развития системы и периодическим характером его перспективного планирования*.

Наряду с совершенствованием схемы оптимального планирования, исследование зоны неопределенности создает условия для гораздо более глубокого изучения структуры, связей и свойств экономических систем и построения на этой основе их адекватных математических моделей. Необходимой предпосылкой для этого является исследование и количественная оценка *экономической устойчивости системы*, т. е. ее способности реагировать на случайные колебания внешних условий относительно меньшими изменениями своих обобщенных экономических характеристик.

Свойство экономической устойчивости некоторых систем иллюстрирует табл. 3: изменение исходных данных в пределах $\pm 10-12\%$ вызывает почти вдвое меньшие колебания суммарных затрат на развитие системы (функционала) и в 4—10 раз меньшую величину экономического риска. Послед-

Таблица 3

Характеристика экономической устойчивости топливно-энергетического хозяйства страны и некоторых его подсистем, %

		Средняя погрешность исходных данных	Погрешность суммарных затрат (функционала)	Величина экономического риска	
				средняя	максимальная
Топливо-энергетическое	хозяйство страны	$\pm 10-12$	± 6	0,8	2,1
Топливо-энергетическое	хозяйство района	$\pm 10-12$	± 4	0,3	1,0
Европейская секция ЕЭЭС		$\pm 10-13$	± 6	0,8	2,3
Объединенная энергосистема	Северо-Запада	$\pm 10-13$	± 7	0,7	2,6

нее обстоятельство особенно важно для разработки рациональных методов планирования экономических систем. Действительно, экономию от применения методов оптимизации часто считают фиктивной только вследствие того, что ее относительная величина (в сложных системах обычно 4—6% суммарных затрат) существенно меньше погрешности исходных данных. Выполненные расчеты показывают ошибочность этой позиции: средний перерасход затрат в системе от наличия погрешности исходных данных $\pm 10-12\%$ не превышает 0,7—0,8%, т. е. намного меньше эффекта оптимизации.

Доказывая эффективность оптимизации экономических систем, исследование зоны неопределенности вместе с тем дает объективные критерии для отказа от чрезмерной детализации математических моделей. Действительно, уточнение и, следовательно, усложнение аппарата оптимизации оправдано только при условии, что оно влияет на результаты больше, чем неизбежная погрешность исходных данных.

Поскольку же влияние погрешности исходных данных находит обобщенное выражение в показателях экономического риска, последние логично использовать в качестве критерия для определения целесообразности различных уточнений моделей. Эти же показатели могут использоваться для оценки силы (меры значимости) различных связей и свойств экономических систем. Подробное рассмотрение критериев и методов такого исследования экономических систем является предметом специальной статьи.

ВЫВОДЫ

1. Объективное существование зоны неопределенности оптимального развития сложных экономических систем оказывает существенное влияние на общую концепцию, методы и схему их оптимального планирования.
2. Наиболее существенным изменением концепции оптимизации экономических систем с учетом фактора неопределенности является признание невозможности полной формализации процесса их оптимального планирования и неизбежности «волевого» выбора окончательного решения из состава равноэкономичных вариантов развития системы.
3. Учет вероятностных свойств экономических систем обуславливает необходимость принципиального совершенствования методов их оптимизации. На примере рассмотренного в работе метода видно, что в условиях неопределенности привычные детерминированные методы оптимизации являются не более как вспомогательным инструментом для выявления состава вариантов, образующих зону неопределенности оптимального разви-

тия системы. Для выбора же оптимального решения в этих условиях необходимо выполнить во всяком случае не менее сложную работу по экономической оценке вариантов в условиях неопределенности и выявлению состава равноэкономичных вариантов с помощью методов теории игр.

4. Учет вероятностных свойств при оптимизации экономических систем позволяет не только выбрать более правильные направления их развития, но и существенно усовершенствовать схему оптимального планирования. Это обеспечивается за счет заблаговременного выявления оптимальных вариантов для всех возможных сочетаний условий развития системы и последующего выбора варианта соответственно реально сложившимся условиям. Такая схема в принципе позволяет устранить противоречие между непрерывностью процесса развития системы и периодическим характером его перспективного планирования.

5. Исследование зоны неопределенности позволяет сделать крупный шаг на пути изучения структуры, связей и свойств экономических систем, давая объективный критерий для оценки их силы (или меры значимости) путем сравнения с влиянием неизбежной погрешности исходных данных. Этот же критерий может использоваться для разработки рациональных методов планирования экономических систем (в частности, их математических моделей). Имеющийся относительно небольшой опыт в этой области, с одной стороны, свидетельствует о явной эффективности оптимизационного подхода к экономическим системам (эффект оптимизации превышает влияние погрешности исходных данных), а с другой стороны, показывает нецелесообразность чрезмерного усложнения инструмента оптимизации.

6. Основными направлениями дальнейших исследований в области учета вероятностных свойств экономических систем, по нашему мнению, являются: а) изучение вероятностных свойств исходной экономической информации и разработка методов их объективной количественной оценки, рациональных с точки зрения результатов оптимизации экономических систем. В этом плане важно, в частности, проверить на других системах полученный нами вывод о слабом влиянии вида закона распределения исходных данных на основные результаты оптимизации системы; б) совершенствование методов исследования зоны неопределенности в направлении повышения их быстродействия, более правильного определения показателей экономического риска и разработки объективных критериев для выявления состава равноэкономичных вариантов; в) расширение способов применения результатов исследования зоны неопределенности для планирования и изучения сложных экономических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Мелентьев. О формировании теории управления большими системами в энергетике. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1969, № 4.
2. В. Н. Лившиц. Принципы учета транспортных затрат при выборе оптимальной схемы размещения и развития производства. Экономика и матем. методы, 1969, т. V, вып. 1.
3. Алгоритмы и программы для БЭСМ-4 решения и исследования задачи линейного программирования. СЭИ — ВИНТИ, 1968, № 309.
4. Б. Г. Санеев. Один метод группировки информации при исследовании зоны неопределенности. В кн. Тр. II конференции молодых научных работников Сибири. Иркутск, 1970.
5. О. Ланге. Оптимальные решения. Основы программирования. М., «Прогресс», 1967.

Поступила в редакцию
9 XII 1969