АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНЫМ ПРОБЛЕМАМ ЭНЕРГЕТИКИ

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

## по технико-экономическому обоснованию проектных решений в энергетике при неоднозначности исходной информации

Москва — Иркутск
1987 г.

gost.e-ecolog.ru

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНЫМ ПРОБЛЕМАМ ЭНЕРГЕТИКИ

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Москва - Иркутск
1988 г.

УДК (620.9+621.31).51

Настоящие "Методические рекомендации" предназначены для корректного учета неоднозначности (неполноты, неопределенности) исходных данных, почти всегда имеющейся при обосновании проектных решений в энергетике. Они являются вторым, существенно переработанным изданием соответствующих "Методических положений", выпущенных в 1977 г.

Данное издание ориентировано на массовые задачи, решаемые в проектных организациях. Оно одобрено бюро Научного совета по комплексным проблемам энергетики АН СССР 12 февраля 1987 г.

Настоящее издание подготовлено рабочей группой в составе: д.т.н. Л.С.Беляева (председатель), к.т.н. Б.Л.Бабурина, к.т.н. Н.Е.Буйнова, к.т.н. Р.Л.Ермакова, д.т.н. А.Н.Зейлигера, чл.-корр. АН СССР А.А.Макарова, к.т.н. Л.И.Мардера, к.т.н. К.Б.Наумова, чл.-корр. АН СССР Л.С.Поспирина, к.т.н. Л.Д.Хабачева, к.т.н. Д.В.Шапота.

055 (02) 5

© Сибирский энергетический институт СО АН СССР (СЭИ), 1988 г.

# С О Д Е Р Ж А Н И Е


I. Введение . . . . . 4
2. Общие положения . . . . . 7
3. Постановка задачи . . . . . I6
4. Отбор представительных сочетаний исходных данных и оценка их вероятностей . . . . . I9
5. Поиск конкурирующих вариантов решения . . . . . 24
6. Расчет и анализ матрицы затрат . . . . . 26
7. Расчет матрицы математических ожиданий затрат, ее анализ и выработка рекомендаций . . . . . 30

Литература . . . . . 33

Приложения:

Пример I. Определение первоочередных конденсационных электростанций в ОЭЭС . . . . . 34
Пример 2. Выбор источников теплоснабжения города . . 42
Пример 3. Выбор установленной мощности ГЭС . . . . . 52
Пример 4. Технико-экономическое обоснование схемы основных сетей ОЭЭС . . . . . 6I
Пример 5. Выбор технологической схемы энергоблока АЭС с учетом надежности . . . . . 69

# I. ВВЕДЕНИЕ

I.I. Настоящие "Методические рекомендации" предназначаются для использования в проектных и научно-исследовательских организациях при обосновании конкретных решений о развитии систем энергетики и их объектов. Имеются в виду следующие группы задач:

а) обоснование развития объектов в локальных (районных) системах энергетики (электроэнергетических, газоснабжающих, энерго- и теплоснабжения городов и промышленных узлов и т.п.) - выбор очередности, сроков сооружения и размещения новых объектов, обоснование реконструкции и демонтажа действующих;

б) обоснование некоторых общесистемных технических решений - единичных мощностей типового оборудования, рациональной величины производственных резервов, целесообразности создания новых видов энергетических технологий (основного оборудования) и т.п.;

в) оптимизация технологических схем и параметров энергетических объектов;

г) выбор схем и параметров нового оборудования.

Для некоторых видов энергетических объектов на основе настоящих "Методических рекомендаций", носящих достаточно общий характер, может потребоваться разработка более детальных "Руководящих указаний", регламентирующих конкретные способы выполнения отдельных этапов обоснования решений.

I.2. Не подпадают под настоящие "Методические рекомендации" задачи оптимизации перспективной структуры (на I0-20 лет) таких больших систем энергетики (БСЭ), как энергетический комплекс (ЭК) страны и экономических районов, единые электроэнергетическая, газоснабжающая, нефтеснабжающая, ядерноэнергетическая системы и их крупные части (секции). Для этих задач, связанных с выявлением рациональных тенденций развития БСЭ и пропорций (соотношений, связей) между входящими в них подсистемами, необходимо применять иные подходы.

Другие методы используются и для задач управления функциониро-

ванием (эксплуатацией) систем энергетики.

I.3. "Методическими рекомендациями" охватывается только стадия подготовки и обоснования решений, т.е. анализ альтернативных (конкурирующих) вариантов рассматриваемого решения, технико-экономическая оценка последствий от их выбора и выработка рекомендаций для инстанций, принимающих решение.

I.4. Настоящие "Методические рекомендации" предназначаются в основном для экономического обоснования решений, когда показателем оптимальности выступают приведенные затраты

$$З = E_н K + И \ , \qquad (I.I)$$

где $K$ - капитальные вложения; $И$ - ежегодные эксплуатационные издержки; $E_н$ - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Общие правила и приемы определения приведенных затрат, включая соизмерение разновременных затрат, приведение вариантов к одинаковому энергетическому эффекту, использование замыкающих затрат на топливо и энергию и др., должны соответствовать общепринятым методикам и положениям [ I-3 и др. ]. Особенности вычисления затрат, связанные с неоднозначностью информации, будут пояснены в следующих разделах.

Учитывать другие критерии и показатели, дополнительно характеризующие эффективность вариантов решения (которые не могут быть оценены экономически), - экологические, социальные, по отдельным дефицитным материалам и т.п. - предполагается на завершающем этапе анализа после выявления экономически равноценных (рациональных) вариантов.

I.5. Под "неоднозначностью" информации здесь понимается неточное знание значений исходных данных, используемых при обосновании решений. Конкретными причинами неоднозначности могут быть природные случайные явления; незнание будущих результатов научно-технического прогресса и разведки полезных ископаемых; неточная реализация производственных планов и проектов; невозможность однозначного предсказания управленческой деятельности людей (незнание конкретных вариантов еще не принятых решений) и др.

При неоднозначной информации приходится рассматривать не од-

но, а несколько (два-три или даже больше) возможных значений соответствующей величины. Если же среди исходных данных имеется несколько неоднозначных величин, то при решении задачи нужно рассматривать некоторое множество сочетаний возможных их значений.

I.6. Неоднозначность информации не всегда приводит к неопределенности выбора решений. Во многих задачах решение может оказаться "устойчивым" - при любых возможных сочетаниях исходных данных наилучшим будет один и тот же вариант. Примером может служить устойчивая, как правило, эффективность повышения единичных мощностей оборудования, применения новых прогрессивных технологий, использования наиболее дешевых энергетических ресурсов и т.п.

Неопределенности выбора можно также избежать, если для всех неоднозначных исходных величин удается достаточно уверенно (достоверно) определить вероятностные характеристики. В таких случаях можно рекомендовать для реализации вариант, обеспечивающий минимум математического ожидания затрат.

Настоящие "Методические рекомендации" следует применять в случаях, когда ожидается, что может возникнуть неопределенность решения, т.е. когда отсутствует точное вероятностное описание для неоднозначных исходных величин и когда для разных сочетаний их значений оптимальными могут оказаться различные варианты решения.

I.7. Основные отличия и преимущества используемого здесь подхода по сравнению с "обычными" детерминированными методами обоснования решений, ориентированных на рассмотрение каких-то одних "наиболее характерных" условий развития системы (на одно сочетание исходной информации), состоят в следующем:

а) расчеты проводятся для нескольких возможных сочетаний исходных данных, отобранных с соблюдением специальных правил и включающих как некоторые средние, так и крайние (благоприятные и неблагоприятные) сочетания информации;

б) предпочтение отдается "гибким" вариантам решения, которые легче (с меньшими затратами) подстраиваются под различные возможные условия развития систем;

в) применяются специальные процедуры выбора решений в условиях неопределенности, которые систематизируют и упрощают анализ, делая его одновременно более строгим и объективным.

Эти особенности повышают качество обоснования решений, умень-

шают элементы субъективизма и "произвола", снижают риск, или перерасход народнохозяйственных средств, обусловленный неточным знанием предстоящих условий.

I.8. По сравнению с первым изданием "Методических положений" [4] здесь уточнены состав этапов решения задачи и способы их выполнения, включая способы определения экономически равноценных (рациональных) вариантов, классификация информации и терминология; расширены разделы, касающиеся общеметодических положений и информации; обновлены примеры и др.

## 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.I. Для обоснования решений необходимо количественное описание неоднозначных величин, которое существенно зависит от того, известны ли вероятности их значений. В этом отношении по своему формализованному (математическому) представлению неоднозначная информация может быть разделена на три вида:

I) вероятностно-определенную;

2) вероятностно-неопределенную;

3) неопределенную.

Иллюстрация этих видов информации дается на рис. 2.I. Там же для полноты картины показана однозначная (детерминированная) информация. Наиболее удобной для практического использования формой вероятностных характеристик является ряд распределения, представляющий таблицу, где для каждого возможного значения величины $y_i$ указывается его вероятность $p_i$ .

У вероятностно-определенных величин ряды распределения считаются точно известными. Практически это относится только к массовым (повторяющимся) показателям, по которым имеются достаточно представительные статистические данные (ряды наблюдений), - к природным явлениям (речному стоку, температурам наружного воздуха и т.п.), аварийности освоенного оборудования и др.

Для вероятностно-неопределенных величин имеющиеся сведения о распределении вероятностей недостаточны для однозначного суждения о нем. Поэтому будет существовать неопределенность в вероятностном описании таких величин.

На рис. 2.I представлены две возможные формы вероятностного описания таких величин: серией рядов распределения и диапазонами

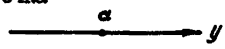
| Вид информации | Форма количественного описания |
|---|---|
| Однозначная | Точка<br><br> |
| Вероятностно-определенная | Ряд распределения<br>$\begin{array}{\|c\|c\|c\|c\|}\hline y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ \hline p_1 & p_2 & \cdots & p_n \\ \hline \end{array}$ $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1.$ |
| Вероятностно-неопределенная | А. Серия рядов распределения<br>$\begin{array}{\|c\|c\|c\|c\|}\hline y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ \hline p_{11} & p_{21} & \cdots & p_{n1} \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{\|c\|c\|c\|c\|}\hline y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ \hline p_{12} & p_{22} & \cdots & p_{n2} \\ \hline \end{array}$ $\cdots$<br>Б. Диапазоны вероятностей<br>$\begin{array}{\|c\|c\|c\|c\|}\hline y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ \hline \underline{p}_1 - \bar{p}_1 & \underline{p}_2 - \bar{p}_2 & \cdots & \underline{p}_n - \bar{p}_n \\ \hline \end{array}$<br>$\sum_{i=1}^{n} \underline{p}_i < 1; \quad \sum_{i=1}^{n} \bar{p}_i > 1.$ |
| Неопределенная | Набор значений (точек)<br><br> |

Рис. 2.I. Формы количественного представления исходной информации

вероятностей. Вторая форма более удобна при экспертной оценке вероятностей – для каждого из возможных (или рассматриваемых) значений величины $y_i$ указываются наибольшая $\bar{p}_i$ и наименьшая $\underline{p}_i$ его вероятности, кажущиеся правдоподобными. Однако эту форму не всегда можно использовать для последующих вероятностных расчетов. Поэтому, как правило, она является промежуточной – на ее основе получают затем серию возможных (экспертных) рядов распределения.

Кроме этих форм возможны и некоторые другие, например, если известен общий вид закона распределения вероятностей, то неопределенность можно отнести к его числовым характеристикам – математическому ожиданию, дисперсии и т.д., которые задаются при этом некоторым диапазоном.

Практически вероятностно-неопределенными величинами могут оказаться отмечавшиеся выше вероятностно-определенные показатели, если по ним нет достаточно полных статистических материалов, а также неопределенные величины (см. ниже), если для них экспертно оцениваются вероятности. Иногда сюда можно причислить также показатели, однозначно заданные плановыми и проектными решениями, но для которых в процессе реализации возможны случайные отклонения. В качестве примера можно указать технико-экономические показатели объектов, сооружаемых с использованием освоенного оборудования и типовых проектов, у которых могут быть отклонения, обусловленные местными условиями. Для получения вероятностных характеристик таких показателей нужно проанализировать (с применением статистических методов) опыт проектирования (планирования) с тем, чтобы оценить погрешность определения аналогичных показателей в прошлом и возможность перенесения этого опыта на будущее.

Неопределенные величины, для которых полностью отсутствуют сведения о вероятностях, можно задать только набором возможных значений без указания их вероятностей. К неопределенным величинам реально относятся показатели, связанные с еще не принятыми решениями, научно-техническим прогрессом, геологическими открытиями и т.п., по которым в принципе нельзя получить статистических сведений, например, потребности в энергии на отдаленные годы (10–20 лет), сроки внедрения и технико-экономические показатели новых энергетических технологий, характеристики новых топливных баз. Вместе с тем, как один из путей раскрытия (уменьшения) неопределенности можно рекомендовать экспертную (притом не-

однозначную) оценку вероятностей значений таких величин с переводом их в предыдущую категорию (вероятностно-неопределенных величин).

2.2. В большинстве задач обоснования решений приходится учитывать несколько неоднозначных исходных величин (всех видов). Их необходимо рассматривать в совокупности (как набор, или вектор неоднозначных величин), отбирая тем или иным способом представительные сочетания их значений. Такие сочетания характеризуют различные возможные условия развития и функционирования проектируемой системы (или объекта).

В связи с этим при решении задачи обоснования важны, в конечном итоге, вероятности сочетаний информации (отобранных "условий развития"). Строго (объективно) определить такие вероятности невозможно, если хотя бы одна из неоднозначных величин не имеет точного вероятностного описания. Поэтому рекомендуется давать субъективную (экспертную) оценку вероятностей отобранных сочетаний неоднозначных исходных данных. При этом нужно учитывать, что экспертным путем нельзя получить однозначные распределения вероятностей, т. е. можно найти лишь несколько (серию) возможных рядов распределения вероятностей, представляющихся правдоподобными. Такое неоднозначное вероятностное описание соответствует "вероятностно-неопределенным" условиям (см. рис. 2.1, где буквой "$У$" будет обозначаться теперь вектор неоднозначных величин).

2.3. Одно из главных положений при обосновании решений состоит в том, что при неоднозначной исходной информации не всегда можно найти единственный наилучший (оптимальный) вариант. Отсутствие достоверного вероятностного описания для неоднозначных исходных величин может привести к неопределенности (неоднозначности) при выборе решения.

Вместе с тем, решения, подлежащие непосредственной реализации, необходимо принимать вполне определенно (однозначно). Поэтому при обосновании решения следует стремиться получить один наилучший вариант (и описываемый в разделах 3-7 подход исходит из такого стремления). Если же из-за большой неопределенности предстоящих условий это не удается, то должны быть выявлены экономически равноценные (рациональные, равноэкономичные) варианты. Окончательный выбор из них варианта, рекомендуемого к исполнению, будет делаться с использованием других, неэкономических критериев,

а также опыта и интуиции проектировщика.

Для определения экономически равноценных вариантов в качестве критерия будет применяться математическое ожидание затрат, рассчитываемое на основе экспертных оценок вероятностей различных сочетаний неоднозначных исходных данных. Ввиду отмечавшейся невозможности найти экспертным путем точные распределения вероятностей и необходимости использования поэтому вероятностно-неопределенной формы представления информации, вариантов, рациональных по математическому ожиданию затрат, может оказаться несколько.

В качестве дополнительной оценки (наряду с математическим ожиданием затрат) будет использоваться максимальное (для каждого сопоставляемого варианта решения) значение затрат. Эта оценка характеризует наихудшие последствия, к которым может привести выбор соответствующего варианта. Иногда учет таких последствий (если они существенно различаются у выявленных равноэкономичных вариантов) может повлиять на окончательный выбор.

2.4. Большое значение для повышения достоверности исходной информации имеет использование принципа обоснования и принятия решений с минимально допустимой заблаговременностью. Этот принцип вытекает из свойства информации естественно уточняться по мере приближения конкретного календарного срока (даты), к которому она относится. Поэтому в случаях, когда действительно имеется неопределенность выбора, окончательные решения следует принимать как можно позже, непосредственно перед началом их реализации. При этом используется каждый раз наиболее свежая информация, имеющая минимально возможную неопределенность.

Практическое осуществление принципа минимальной заблаговременности требует соответствующей организации управления. Так, при проектировании (и планировании) непрерывно развивающихся систем окончательные решения должны приниматься только по первоочередным объектам или для ближайшего интервала времени. По следующим объектам или интервалам времени окончательные решения нужно принимать позднее, когда лучше прояснится реальная обстановка. При этом проектирование сложных технических систем (например, электроэнергетических) будет представлять собой непрерывный процесс последовательного обоснования назревших первоочередных решений.

Кроме того, целесообразно разбивать (когда это можно) принятие решений на этапы. Например, раздельно принимать решения о

начале проектирования и о начале строительства объектов с параллельным проектированием нескольких конкурирующих объектов. При этом, с одной стороны, в процессе проектирования уточнятся технико-экономические показатели объектов и, с другой стороны, за время, необходимое для проектирования, прояснятся прочие внешние условия, что уменьшит неопределенность информации при принятии окончательного решения о строительстве объекта.

2.5. Осуществление непрерывного проектирования развивающихся систем требует четкого определения последовательности (очередности) принятия и взаимной увязки различных решений по развитию их объектов. Надлежащий учет неопределенности информации приводит к тому, что единая, казалось бы, задача оптимизации развития рассматриваемой системы распадается фактически на ряд задач (подзадач) обоснования отдельных решений (в определенной последовательности и с соответствующей заблаговременностью). Каждая такая задача должна быть четко поставлена и согласована с другими задачами по времени (последовательности) решения и по составу обменной информации. В том числе должны быть уяснены связи рассматриваемой задачи с задачами развития систем более высокого иерархического уровня, которые назывались в п.I.2. При этом результаты (варианты) решения какой-либо задачи более высокого уровня могут входить в состав исходных данных задачи более низкого уровня, решаемой позднее.

2.6. Одна из важнейших особенностей решения задач при неоднозначности исходной информации - необходимость соблюдения ресурсных, балансовых, конструкционных и других ограничений при варьировании информацией о перспективных условиях развития и функционирования энергетических систем и объектов. Практически это означает, что намечаемые варианты решения должны обладать способностью адаптироваться к изменениям будущих условий, а варианты, не обеспечивающие соблюдение всех ограничений хотя бы при одном сочетании условий, признаются недопустимыми и исключаются из рассмотрения*.

* В отдельных случаях, когда для некоторых вариантов решения не удается обеспечить заданную надежность энергоснабжения потребителей, для обеспечения экономической сопоставимости вариантов в состав затрат могут включаться ущербы, имеющие место у потребителей при снижении надежности энергоснабжения.

Свойство адаптивности решений является фундаментальным для постановки и методов решения проектных задач с учетом неоднознач - ности исходной информации. По способам адаптации задачи обоснования решений можно разделить на два типа. К первому типу относятся задачи выбора состава, очередности и сроков сооружения либо технического перевооружения объектов в локальных системах энергетики, а также задачи выбора системных параметров этих объектов (установленной мощности, производительности и др.). В таких задачах адаптация вариантов решений к различным условиям развития систем осуществляется прежде всего путем изменения сроков (тем - пов) ввода мощностей энергетических объектов.

В экстремальных ситуациях, когда изменение сроков сооружения наиболее экономичных объектов и нормативные темпы ввода мощнос - тей на них не обеспечивают выполнения балансовых и ресурсных ог - раничений, могут использоваться специальные мероприятия, называемые "корректирующими". Это экстренное сооружение дополнительных электрических или трубопроводных связей с другими системами, пе - ревод энергетических объектов и оборудования на непроектный режим работы, временное снижение надежности энергоснабжения (с повыше - нием вероятности ущербов у потребителей) и т.п. Состав таких ме - роприятий определяется проектировщиком при постановке задачи.

Корректирующие мероприятия реализуются в более короткие сроки, чем основное решение, но требуют повышенных затрат. Для большей четкости параметры, характеризующие корректирующие мероприятия, будут обозначаться буквой $z$ в отличие от основных оптимизируемых параметров $x$, характеризующих обосновываемое решение.

К задачам второго типа относятся задачи выбора конструктивно-технологических решений по энергетическим объектам и обоснова - ния схем и параметров энергетического оборудования. Принципиальной особенностью этих задач, называемых иногда условно-статическими, является то, что в каждом из конкурирующих вариантов решения технические характеристики и номинальные параметры объектов и оборудования остаются фактически неизменными во времени, тогда как условия работы объектов и оборудования и, соответственно, их экономическая эффективность могут существенно изменяться в перспективе.

В рассматриваемой группе задач возможности адаптации техни - ческих решений к изменяющимся условиям в принципе ограничены и

должны быть предусмотрены уже на стадии проектно-конструкторских работ по объектам и оборудованию путем выбора гибких технических решений по отдельным узлам, повышения производительности (или дублирования) вспомогательных установок и т.п. Для этого необходим детальный анализ технического соответствия намечаемых вариантов решения всей совокупности условий работы объектов и оборудования в перспективе. Это позволяет, с одной стороны, выявить и исключить недопустимые решения, а с другой - определить конкретный состав мероприятий (и связанные с их осуществлением затраты), обеспечивающих адаптацию конкурирующих вариантов решений к различным условиям. Иногда для приведения вариантов к одинаковому энергетическому эффекту могут использоваться замыкающие затраты на топливо, электро- и теплоэнергию.

2.7. Необходимость адаптации обосновываемых решений к различным условиям в перспективе предопределяет целесообразность рассмотрения "гибких" вариантов решений. "Гибкость" вариантов может достигаться несколькими путями:

включением в структуру систем энергетики объектов и установок различного типа, технические характеристики которых обеспечивают работоспособность системы при всех сочетаниях условий;

созданием различного рода резервов - в виде проектных и строительных заделов, резервов мощности в системах, запасов пропускной способности электрических и трубопроводных связей;

повышением производительности элементов и выбором гибких технологических схем энергетических установок.

Использование "гибких" решений зачастую оказывается наиболее эффективным путем снижения экономических потерь от незнания будущих условий развития систем энергетики.

2.8. Основная идея рекомендуемого подхода, излагаемого в разделах 3-7, состоит в отборе ряда представительных сочетаний неоднозначной информации (характеризующих возможные условия развития и функционирования проектируемой системы или объекта) и нескольких конкурирующих вариантов решения, для которых рассчитываются затраты и составляется матрица затрат. Эта матрица количественно характеризует эффективность различных вариантов решения при разных сочетаниях исходных данных. Затем производится анализ матрицы затрат и выбор рациональных (равноэкономичных)

вариантов.

Последовательность работ по обоснованию решений, соответствующая такому подходу, представлена на рис. 2.2. Решение задачи слагается из нескольких достаточно самостоятельных этапов, на каждом из которых необходимо участие проектировщика. В связи с этим процесс решения задачи нельзя полностью автоматизировать и он строится по "человеко-машинной" схеме (если для расчетов используются математические модели и ЭВМ).

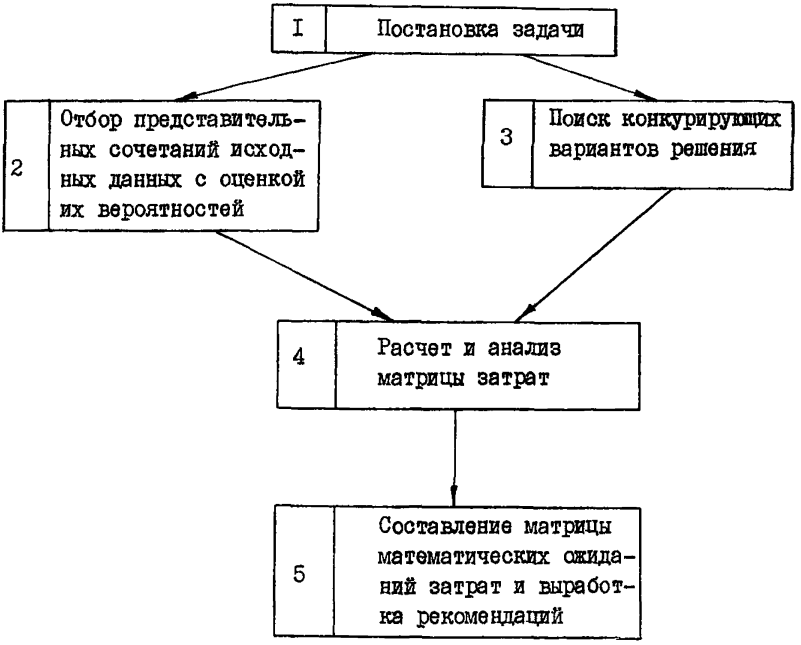



Рис. 2.2. Общая схема обоснования решений

Особое место в показанной схеме занимает расчет матрицы затрат (этап 4), представляющей собой таблицу, строки которой соответствуют различным конкурирующим вариантам решения, а столбцы - разным сочетаниям значений неоднозначных исходных данных. В клеточках таблицы записываются приведенные затраты для соответствующих вариантов решения и сочетаний информации.

Составление матрицы затрат необходимо для возможности корректного сопоставления между собой конкурирующих вариантов решения при варьировании значениями исходных данных - нужно иметь экономические оценки каждого конкурирующего варианта решения при всех (притом одних и тех же) рассматриваемых сочетаниях исходной информации.

В следующих разделах настоящих "Методических рекомендаций" будут описаны способы выполнения отдельных этапов, показанных на рис. 2.2.

## 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

3.1. При постановке задачи (на этапе I) необходимо:

а) четко определить смысл обосновываемого решения и состав характеризующих его (оптимизируемых) параметров - компонент вектора $x$ ; эта операция свойственна и детерминированным постановкам задач и обычно не вызывает трудностей; конкретные сочетания значений компонент вектора $x$ будут называться "вариантами решения";

б) выявить состав неоднозначных исходных данных, которые создают неопределенность ситуации, - вектор $y$ ; в компоненты вектора $y$ нужно включать лишь "существенные" показатели, причем число их желательно иметь минимальным (см. п.3.2); конкретное сочетание значений компонент вектора $y$ будет называться "сочетанием исходных данных" или "условиями развития";

в) установить возможные корректирующие мероприятия, с помощью которых можно обеспечить соблюдение ограничений и балансовых условий при фиксированных значениях векторов $x$ и $y$ , и состав параметров, их характеризующих, - вектор $z$ ; данная операция свойственна задачам с неоднозначной (в том числе вероятностно-определенной) информацией (см. п.2.6);

г) записать оценочную функцию $3(x, y, z)$ либо установить

алгоритм (процедуру), по которому рассчитываются экономические затраты при фиксированных варианте решения $x$ и сочетании исходных данных $y$ (вектор $z$ при этом варьируется для обеспечения соблюдения ограничений и балансов); в принципе это должен быть такой же метод расчета приведенных затрат, как и при детерминированном задании информации, но здесь нужно дополнительно предусмотреть возможность изменения исходных данных и обеспечение энергетической сопоставимости вариантов путем использования корректирующих мероприятий и ущербов (стоимость которых включается в оценочную функцию); для сложных задач желательно иметь математическую модель для определения затрат на ЭВМ.

3.2. При постановке задачи очень важно определить минимальный состав неоднозначных исходных величин (компонент вектора $y$), значения которых будут варьироваться в процессе анализа. В него нужно включать только "существенные" показатели, неопределенность которых действительно влияет на выбор варианта решения.

Общим критерием для отбора "существенных" показателей служит тот факт, что при изменении значения показателя (в диапазоне его неоднозначности) может измениться оптимальный вариант решения. Например, выбор того или иного объекта системы в качестве первоочередного (для строительства) очень часто зависит от того, принимаются ли его экономические показатели (удельные капиталовложения или приведенные затраты) на верхней или на нижней границе диапазона возможных значений.

Для многих неоднозначных показателей их "существенность" бывает известна проектировщику на основе предыдущего опыта. Для уверенного же суждения о "сомнительных" показателях, в принципе, могут потребоваться достаточно трудоемкие исследования "чувствительности решения", которые представляют собой многовариантные оптимизационные расчеты при варьировании значениями "сомнительных" неоднозначных показателей. Если такие исследования не проводились, то состав "существенных" неоднозначных исходных данных следует принимать избыточным с включением в него "сомнительных" показателей. В дальнейшем же по мере накопления опыта решения рассматриваемой задачи состав "существенных" показателей нужно уточнять, делая их число как можно меньше для уменьшения общей трудоемкости расчетов.

Остальные (несущественные) неоднозначные показатели условно

принимаются (задаются) в расчетах как детерминированные на уровне своих средних (наиболее вероятных) или некоторых крайних (повышенных или пониженных) значений в зависимости от особенностей конкретной задачи. Примерами задания крайних детерминированных значений для случайных (неоднозначных) величин могут служить расчетные (низкие) температуры наружного воздуха при проектировании систем теплоснабжения и гарантированные мощности ГЭС, соответствующие маловодным гидрологическим условиям расчетной обеспеченности, при проектировании электроэнергетических систем. Такого рода расчетные значения обосновываются специальными исследованиями и задаются затем нормативными материалами.

3.3. Определенные особенности имеют постановки динамических задач, в которых рассматривается длительный расчетный период, разбиваемый на несколько интервалов времени. В таких задачах, как правило, нужно различать первоочередные решения, для обоснования которых и ставится задача, и последующие решения, которые лишь имитируются для определения последствий от первоочередных решений. Эти последующие решения могут быть различными для разных вариантов первоочередных решений и обеспечивать их адаптацию к складывающимся условиям развития системы (см. п.2.6).

Некоторые неоднозначные величины, например потребности в энергии, в динамических задачах изменяются по интервалам времени, и необходимо рассматривать их реализации (последовательности, или ряды значений по интервалам) за расчетный период.

Оценочная функция в динамических задачах представляет собой обычно сумму затрат по интервалам времени с приведением их к какому-то одному году.

Примеры I и 4, даваемые в приложении, иллюстрируют постановки динамических задач выбора первоочередных электростанций и обоснования развития электрической сети ОЭЭС на ближайшую пятилетку. В остальных примерах рассматриваются условно-статические задачи.

## 4. ОТБОР ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ СОЧЕТАНИЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОЦЕНКА ИХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

4.1. На этом этапе решения задачи требуется отобрать несколько ($S$) сочетаний значений неоднозначной информаций, которые будут рассматриваться на последующих этапах, и оценить их вероятность. Как правило, $S$ не должно быть очень большим, так как для каждого сочетания исходных данных $y_s (s = 1, \ldots, S)$ в дальнейшем будет выполняться значительный объем вычислений. Оно должно устанавливаться с учетом особенностей задачи, исходной информации, используемых математических моделей и ЭВМ. Предварительно можно ориентироваться на $S$ = 5-15.

Сейчас еще нет вполне строгих, четких и полных правил выполнения этого этапа решения. Ниже будет сделан ряд рекомендаций, которые оставляют значительную свободу для интуиции и творчества проектировщика.

4.2. При отборе сочетаний информации, естественно, следует учитывать их вероятность. При этом приходится искать компромисс между двумя противоречивыми стремлениями. С одной стороны, желательно при ограниченном числе $S$ как можно полнее охарактеризовать ситуацию, т.е. стремиться к максимальному разнообразию (отличию) отбираемых сочетаний, включая в их число не только некоторые средние (кажущиеся более вероятными), но и различные крайние (благоприятные и неблагоприятные) сочетания, представляющиеся реально возможными. С другой стороны, нужно стремиться более строго и полно учесть вероятности сочетаний - не выбирать слишком маловероятные сочетания, рассмотреть по возможности полную группу случайных событий, сумма вероятностей которых равнялась бы единице, и т.п. Возможности осуществления всего этого зависят от числа неоднозначных величин (компонент вектора $y$), степени их неопределенности и влияния на результаты решения и других особенностей задачи.

4.3. Процесс анализа существенной исходной информации, определенной при постановке задачи (см. п.3.2), при отборе представительных ее сочетаний и оценке их вероятностей можно разделить на несколько стадий:

I) выбор нескольких "расчетных" значений для каждого существенного показателя, включенного в число компонент вектора $y$;

последующее рассмотрение этих нескольких значений (а не какого-то одного) и является принципиальным отличием неоднозначных величин от детерминированных;

2) оценка вероятностей намеченных "расчетных" значений отдельных неоднозначных показателей; такая оценка делается, как правило, экспертным путем и будет неоднозначной - соответствовать вероятностно-неопределенной форме количественного описания (см. п.2.I и рис. 2.I);

3) отбор $S$ представительных сочетаний "расчетных" значений существенных показателей (что является главной целью данного этапа решения задачи);

4) оценка вероятностей этих сочетаний (в виде нескольких возможных (экспертных) рядов распределения).

Указанные стадии, особенно две последние, взаимосвязаны друг с другом, поэтому иногда могут потребоваться итерации в их осуществлении. В следующих пунктах будут даны рекомендации по каждой стадии анализа.

4.4. "Расчетные" значения неоднозначных величин определяются различными способами в зависимости от смысла (природы) и особенностей соответствующего показателя:

по статистическим (или отчетным) данным;

по результатам исследований развития внешних систем (энергетического комплекса, единых отраслевых систем и т.п.);

на основе научно-исследовательских, геологоразведочных и проектно-конструкторских работ в соответствующих областях.

Иногда достаточно рассмотреть два "расчетных" значения - повышенное и пониженное (или "оптимистическое" и "пессимистическое"). Это могут быть также просто случаи наличия или отсутствия некоторого фактора (объекта, события). В некоторых задачах может потребоваться выделить три "расчетных" значения какого-то исходного показателя, т.е. рассмотреть еще и некоторое "среднее" его значение.

Выбираемые повышенное и пониженное значения не должны быть самыми крайними - максимально и минимально возможными значениями, так как они оказались бы тогда очень маловероятными. Рекомендуется выбирать эти значения так, чтобы вероятность выхода за пределы каждого из них (соответственно в большую или меньшую сторону) составляла по I0-20%.

4.5. При назначении вероятностей отобранным "расчетным" значениям каждого неоднозначного показателя должны соблюдаться следующие общие правила:

I) вероятность, приписанная любому значению, должна быть числом между нулем и единицей;

2) сумма вероятностей всех "расчетных" значений должна равняться единице;

3) если два или более значений объединяются (группируются) в одно эквивалентное (осредненное), то вероятность последнего должна быть равна сумме вероятностей, приписанных исходным значениям.

Первым двум требованиям должен удовлетворять каждый конкретный ряд распределения величины (см.рис.2.I). В принципе же на данной стадии анализа исходной информации следует получить серию (из двух-трех) рядов распределения, представляющихся правдоподобными, так как попытка найти экспертным путем одно "совершенно точное" распределение была бы явно несостоятельной.

Иногда для экспертов, производящих оценку вероятностей, может оказаться более удобным определять их диапазоном для каждого "расчетного" значения рассматриваемой величины (форма"Б" для вероятностно-неопределенной информации на рис.2.I). При этом, естественно, второе из указанных правил уже не может быть соблюдено. Однако данная форма вероятностного описания является промежуточной - впоследствии с ее использованием должны быть определены либо серия рядов распределения данной величины, либо серия рядов распределения для сочетаний значений всех неоднозначных величин (см. п.4.8).

4.6. Перед началом непосредственного отбора сочетаний существенных неоднозначных величин необходимо проанализировать их взаимосвязанность (коррелированность). Например, может быть известно, что при повышенном значении какой-то одной величины нельзя ожидать повышенных же (или, наоборот, пониженных) значений некоторых других величин. В динамических задачах, естественно, должны учитываться корреляционные связи между значениями какой-то величины в смежных интервалах времени. Сочетания значений таких (коррелированных) величин нужно выбирать согласованно. Это позволит уменьшить число рассматриваемых сочетаний - исключить явно нереальные.

На основе такого анализа может оказаться возможной групши-

ровка неоднозначных величин, значения которых будут меняться "синхронно", или построение некоторой их иерархии, когда значения одной из величин (факторов) предопределяют (или исключают) возможные значения других величин.

4.7. Если позволяют конкретные условия решения задачи, то рекомендуется производить "полный перебор" сочетаний "расчетных" значений неоднозначных величин (с учетом, конечно, возможной их коррелированности). Это иногда оказывается возможным, если число этих величин и их "расчетных" значений невелико или если для последующих расчетов используются эффективные программы на ЭВМ.

При отсутствии такой возможности следует комбинировать полный перебор "расчетных" значений наиболее важных показателей (одного-двух, иногда трех) с отбором ограниченного числа сочетаний остальных неоднозначных данных. При этом рекомендуется придерживаться следующих правил:

а) отбирать сочетание средних значений величин, как наиболее вероятное (если было намечено по три "расчетных" значения показателей);

б) отбирать сочетания крайних значений, наиболее благоприятные и неблагоприятные для различных конкурирующих вариантов решения;

в) из отмечавшихся в п.4.2 двух противоречивых тенденций отдавать предпочтение стремлению к максимальному разнообразию отбираемых сочетаний, так как строгость и полноту учета вероятностей при отборе сочетаний в данном случае обеспечить невозможно.

В целом на данной стадии анализа будут отобраны $S$ сочетаний исходных данных:

$$y_s ; \quad s = 1, \ldots, S , \qquad (4.1)$$

характеризующих возможные условия развития объекта и системы, в которой он находится.

4.8. Теперь нужно оценить возможные вероятности отобранных сочетаний информации $y_s$. Эти вероятности выражают представления проектировщика (или экспертов) о возможностях того, что фактически в будущем сложатся те или иные условия (оценку "шансов" их появления). Такие оценки делаются на основе опыта и интуиции специалистов и, как уже отмечалось в п.п. 2.1 и

2.2, они не могут быть однозначными, т.е. предполагается получение серии возможных рядов распределения вероятностей. Попытки получить экспертным путем однозначное распределение явились бы своего рода самообманом. Поэтому необходимо получить несколько ( $Q$ ) экспертных рядов распределения

$$F_q(y); \quad q = 1, \ldots, Q, \tag{4.2}$$

которые указывают вероятности $p_{sq}$ отдельных сочетаний информации $y_s$ для $q$ -го ряда распределения, причем для каждого ряда $F_q$ сумма этих вероятностей равна единице:

$$\sum_{s=1}^{S} p_{sq} = 1; \quad q = 1, \ldots, Q. \tag{4.3}$$

Практически достаточно наметить два-три ряда распределения (т.е. $Q$ = 2-3), которые являлись бы крайними в смысле наибольшего благоприятствования разным конкурирующим вариантам решения. Ряд распределения будет более благоприятным для какого-то варианта решения, если в нем имеют повышенную вероятность те сочетания исходных данных, при которых этот вариант является оптимальным (локально-оптимальным ).

Если сочетания исходных данных $y_s (s = 1, \ldots, S)$ отобраны путем "полного перебора" расчетных значений отдельных величин, то их вероятности, в принципе, могут определяться как произведения вероятностей значений отдельных величин, которые вошли в сочетание. Однако нужно учитывать, что вероятности расчетных значений величин заданы неоднозначно (см. п.4.5) - серией рядов распределения или диапазонами значений вероятностей. Поэтому при составлении рядов распределения сочетаний $F_q$ необходимо комбинировать ряды распределения (или границы диапазонов вероятностей) отдельных величин таким образом, чтобы получить два-три ряда $F_q$, в целом благоприятных или неблагоприятных для различных конкурирующих вариантов решения $x$ . При этом нужно следить за соблюдением равенства (4.3).

Если же отобранные $S$ сочетаний $y_s$ не охватывают всего множества возможных сочетаний "расчетных" значений неоднозначных величин (второй случай в п.4.7), то процесс приписывания им вероятностей будет менее строгим (более эвристичным). В этом случае сочетаниям $y_s$ должны приписываться более высокие вероятности, чем те , которые были бы получены перемножением вероят-

ностей соответствующих значений отдельных величин, так как каждое отобранное сочетание $y_s$ становится "представителем" и некоторых других сочетаний, не вошедших в число $S$. Четкого алгоритма определения этих вероятностей нет, можно указать лишь некоторые регламентирующие правила (часть из них уже называлась):

а) следует наметить два-три ряда распределения $F_q$, по возможности наиболее и наименее благоприятных для различных вариантов решения $x_i$;

б) вероятности $P_{sq}$ отдельных сочетаний информации $y_s$ при каждом ряде $F_q$ должны устанавливаться с учетом значений вероятностей этих сочетаний, полученных как произведение вероятностей соответствующих "расчетных" значений отдельных величин;

в) должно соблюдаться условие (4.3) - сумма вероятностей $P_{sq}$ в каждом ряду должна равняться единице.

В примерах, даваемых в приложениях, иллюстрируются различные случаи присвоения вероятностей отобранным сочетаниям неоднозначной исходной информации.

В целом в результате данного этапа решения задачи будут отобраны $S$ сочетаний исходных данных (4.1), которые будут рассматриваться на следующих этапах, и два-три ряда распределения вероятностей $F_q$ (4.2) для этих сочетаний.

## 5. ПОИСК КОНКУРИРУЮЩИХ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ

5.1. На данном, третьем этапе решения задачи (см. рис.2.2) требуется найти варианты решения $x_i$ ($i = 1, \ldots, I$), которые в принципе могут оказаться рациональными и должны подвергаться поэтому обстоятельному анализу. При этом важно не упустить из рассмотрения те "гибкие" варианты, о которых говорилось в п.2.7.

В некоторых задачах состав конкурирующих вариантов решения бывает очевиден по смыслу задачи (например, при выборе мест размещения объектов систем) или может делаться интуитивным путем. Возможности интуитивного отбора в значительной мере зависят от того, какое общее число вариантов $I$ можно практически рассмотреть по трудоемкости последующих расчетов. Если имеется возможность рассмотреть все варианты, интуитивно представляющиеся интересными, то данный этап решения задачи оказывается достаточно простым.

5.2. Для задач, в которых набор конкурирующих вариантов не очевиден, рекомендуется определять так называемые "локально-оптимальные" варианты. Они находятся путем детерминированной оптимизации параметров $x$ для нескольких сочетаний информации. Полученные при этом "локально-оптимальные" варианты (оптимальные для соответствующих условий развития) в принципе могут оказаться рациональными и заслуживают более детального анализа.

Данный способ, естественно, достаточно трудоемок, так как требует проведения серии оптимизационных расчетов. Возможность его использования и количество выполняемых расчетов будут зависеть от наличия математических моделей, параметров имеющихся ЭВМ, установленных сроков решения задачи и т.п. Если позволяют эти условия, то поиск локально-оптимальных вариантов следует провести для всех $S$ сочетаний информации, отобранных на предыдущем этапе решения задачи. Однако, в принципе, число сочетаний информации, для которых проводятся такие расчеты, может отличаться от $S$ как в меньшую, так и в большую сторону, т.е. могут быть намечены дополнительные сочетания исходных данных, для которых определяются локально-оптимальные варианты.

5.3. Локально-оптимальные варианты не охватывают в общем случае всего множества вариантов, потенциально способных стать рациональными (такие варианты называются "доминирующими", их смысл будет пояснен позже в п. 6.4). Могут существовать уже отмечавшиеся "гибкие" варианты, которые не являются оптимальными ни при одном сочетании информации, но легче, чем локально-оптимальные, подстраиваются под всю гамму возможных в будущем условий. К сожалению, сейчас еще нет других способов определения "гибких" вариантов, кроме интуитивного. В связи с этим для сложных задач целесообразно сочетать способы отбора: выявить ряд локально-оптимальных вариантов и добавить к ним "гибкие" варианты, намеченные интуитивным путем с учетом отмеченных в п.2.7 способов обеспечения "гибкости".

5.4. В случаях, когда конкурирующие варианты решения определялись путем детерминированных оптимизационных расчетов, следует проверить, действительно ли в данной задаче имеется неопределенность выбора, или, может быть, локально-оптимальные варианты оказались одинаковыми (совпадающими) в свете обосновываемого действия. Такая проверка должна касаться только основных парамет-

ров $x$ , характеризующих обосновываемое решение. Параметры $z$ , относящиеся к корректирующим мероприятиям, не принимаются во внимание, так как они, естественно, могут быть разными при одном и том же варианте обосновываемого решения.

Если совпадение результатов имеет место, то решение задачи можно считать законченным и выявленный единственный наилучший вариант (оптимальный для всех рассмотренных сочетаний информации) следует рекомендовать для реализации. Если же локально-оптимальные варианты оказались разными, то их вместе с интуитивно отобранными "гибкими" вариантами включают в число тех вариантов, которые будут рассматриваться при дальнейшем решении задачи.

## 6. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ МАТРИЦЫ ЗАТРАТ

6.I. Матрица затрат рассчитывается в соответствии с принятой постановкой задачи и установленным видом оценочной функции $З(x,y,z)$. Расчеты проводятся для всех отобранных на предыдущих этапах значений $x_i$ и $y_s$ . Каждый отдельный расчет (для одной пары " $i$ " и " $s$ ") дает элемент платежной матрицы $З_{is}$ . В целом матрица затрат, обозначаемая $\| З_{is} \|$ , представляет собой таблицу из $I$ строк и $S$ столбцов. Общий ее вид показан в левой части табл. 6.I.

Одно из главных требований, которое должно быть выдержано при расчете матрицы затрат, - это обеспечение энергетической (а если нужно, то и экологической и прочей) сопоставимости конкурирующих вариантов решения по отдельным столбцам матрицы затрат (для каждого отдельного сочетания информации $y_s$ ). Такая сопоставимость обеспечивается, если соблюдаются балансы энергии и мощности, а также экологические и прочие ограничения, наложенные при постановке задачи. Для этого и необходимо использование корректирующих мероприятий и ущербов.

Если указанное требование выдержано, то обеспечивается полная сопоставимость конкурирующих вариантов решения: по условиям развития (каждый вариант рассчитан при одних и тех же сочетаниях исходных данных) и по энергетическому (и прочему) эффекту для каждого отдельного сочетания условий.

Таблица 6.I

Матрица затрат и характерные оценки вариантов

| $x$ \ $y$ | Матрица затрат | | | | | Характерные оценки | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $y_1$ | ... | $y_s$ | ... | $y_S$ | $3_i^{max}$ | $M_{i1}$ | ... | $M_{iq}$ | ... |
| $x_1$ | $3_{11}$ | | $3_{1s}$ | | $3_{1S}$ | $3_1^{max}$ | $M_{11}$ | | $M_{1q}$ | |
| $x_2$ | $3_{21}$ | | $3_{2s}$ | | $3_{2S}$ | $3_2^{max}$ | $M_{21}$ | | $M_{2q}$ | |
| ⋮ | | | | | | | | | | |
| $x_i$ | $3_{i1}$ | | $3_{is}$ | | $3_{iS}$ | $3_i^{max}$ | $M_{i1}$ | | $M_{iq}$ | |
| ⋮ | | | | | | | | | | |
| $x_I$ | $3_{I1}$ | | $3_{Is}$ | | $3_{IS}$ | $3_I^{max}$ | $M_{I1}$ | | $M_{Iq}$ | |

6.2. При построении матрицы затрат возможны случаи, когда для некоторого сочетания исходных данных $y_m$ затраты $3_{im}$ у всех вариантов решения $x_i (i=1,\dots,I)$ очень велики - значительно превышают затраты при других условиях $y_s (s \neq m)$. Это означает, что условия $y_m$ оказались наиболее тяжелыми, притом явно "выпадающими", т.е. отличающимися в каком-то отношении от остальных рассмотренных условий.

В таких случаях следует проанализировать причины такого отличия и проверить, нельзя ли их устранить путем проведения соответствующих мероприятий в смежных или вышестоящих системах (объектах). Такая проверка представляет собой одну из возможных форм увязки задач разного иерархического уровня, о которой говорилось в п.2.5. Если затраты на такие мероприятия во внешних системах (обозначаемые $3_m^{внеш}$) меньше, чем наименьшие затраты в столбце матрицы затрат, соответствующем условиям $y_m$,

$$3_m^{внеш} \leqslant \min_i 3_{im}, \qquad (6.I)$$

то это сочетание исходных данных необходимо исключить из числа рассматриваемых, уменьшив количество столбцов матрицы затрат.

6.3. Матрица затрат дает общую количественную оценку ситуации, для которой решается задача. Однако эта оценка оказывается

неоднозначной (см.табл.6.I) - каждый вариант решения $x_i$ характеризуется строкой (вектором) значений оценочной функции $3_{is}$, полученных при разных сочетаниях исходных данных $y_s$ ( $s = 1, \ldots, S$ )*. Поэтому для сопоставления вариантов в последующем будут использоваться характерные (или критериальные) оценки, показанные в правой части табл.6.I. Наиболее важные из них - математические ожидания затрат (средневзвешенные затраты) $M_{iq}$, определяемые для различных экспертных рядов распределения $F_q$, полученных ранее (см. п.4.8). Расчет матрицы $\| M_{iq} \|$ и выбор на ее основе рациональных вариантов решени.. будут рассмотрены в следующем разделе. Кроме того, как указывалось в п.2.3, существенный интерес представляют максимальные затраты ( $3_i^{max}$ ).

Анализ матрицы затрат состоит из двух операций: а) определения доминирующих вариантов решения, упоминавшихся ранее в п.5.3, и б) определения максимальных затрат $3_i^{max}$ для каждого доминирующего варианта**.

6.4. Поясним операцию по определению доминирующих вариантов. Это название объясняется тем, что каждый такой вариант лучше любого другого (доминирует над другим) по крайней мере при одном сочетании исходных данных. В связи с этим каждый доминирующий вариант потенциально может оказаться рациональным.

Множество доминирующих вариантов проще определить путем выявления и исключения недоминирующих вариантов, которые хуже одного из доминирующих. Для недоминирующего варианта $j$ имеет место следующее неравенство (при попарном сопоставлении его с домини-

---

* При детерминированных условиях имелся бы только один столбец и оценка каждого варианта была бы однозначной.

** Иногда при анализе матрицы затрат кроме $3_i^{max}$ могут представить интерес другие характерные оценки, например среднеарифметические затраты $\bar{3}_i$ или максимальные значения рисков $R_i^{max}$. Они дают дополнительную характеристику ситуации и могут способствовать более уверенному выбору варианта, принимаемого к исполнению. В частности, максимальные риски $R_i^{max}$ используются в примере 3 по выбору установленной мощности ГЭС, даваемом в приложении.

рующим вариантом $i$ ):

$$З_{js} \geq З_{is} \qquad \text{при всех} \quad s = 1, \ldots, S, \qquad (6.2)$$

причем хотя бы при одном $S$ имеет место строгое неравенство. Очевидно, что такие варианты явно плохи, так как требуют повышенных затрат по сравнению с доминирующим вариантом при некоторых сочетаниях информации, будучи равноценными при остальных сочетаниях. Поэтому их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Для численного примера, приведенного в табл.6.2, варианты $x_1$, $x_2$ и $x_4$ являются локально-оптимальными, а поэтому и доминирующими - каждый из них лучше остальных вариантов при соответствующих сочетаниях исходных данных (в каждом столбце подчеркнуты минимальные затраты, указывающие вариант решения, оптимальный при данном сочетании информации). Вариант $x_3$ ,не будучи оптимальным ни при одних условиях, также является доминирующим: он лучше варианта $x_1$ при сочетании информации $y_5$ , лучше варианта $x_2$ при $y_4$ и $y_5$ и лучше варианта $x_4$ при $y_1$ и $y_2$ . Вариант $x_5$ является недоминирующим - над ним доминирует вариант $x_3$ при сочетаниях информации $y_1$ , $y_3$ и $y_4$ (при $y_2$ и $y_5$ эти варианты равноценны), поэтому может дальше не рассматриваться.

Таблица 6.2

Пример матрицы затрат

| $x_i$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $З_i^{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 5 | 2 | 8 | 4 | I4 | I4 |
| $x_2$ | 2 | 3 | 4 | I2 | 8 | I2 |
| $x_3$ | 5 | 7 | 9 | 5 | 5 | 9 |
| $x_4$ | 8 | I0 | 3 | 5 | 4 | I0 |
| $x_5$ | 6 | 7 | I0 | 7 | 5 | I0 |

Следует отметить, что если все конкурирующие варианты $x_i (i = 1, \ldots, I)$ , для которых рассчитывалась матрица затрат, определялись на третьем этапе путем оптимизационных расчетов (если рассматриваются только локально-оптимальные варианты),то данная стадия анализа излишня - все эти варианты заведомо доминирующие.

Если доминирующий вариант оказался единственным (такие случаи иногда возможны), то решение задачи прекращается и этот вариант рекомендуется для исполнения.

6.5. Максимальные для варианта $x_i$ затраты $З_i^{max}$ определяются как наибольшая из величин, записанных в соответствующей строке матрицы:

$$З_i^{max} = \max_s З_{is} . \qquad (6.3)$$

Они характеризуют то наихудшее, что может дать выбор данного варианта. Эта оценка может рассматриваться как определенный показатель "гибкости" варианта - она показывает, насколько трудно подстроить данный вариант под самые неблагоприятные для него условия. Кроме того, она имеет смысл гарантийной оценки - указывает верхний предел затрат, который не будет превзойден при любом стечении обстоятельств (естественно, в рамках рассмотренных условий $y_s$ ).

В табл. 6.2 указаны значения максимальных затрат для показанного там численного примера матрицы затрат.

## 7. РАСЧЕТ МАТРИЦЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОЖИДАНИЙ ЗАТРАТ, ЕЕ АНАЛИЗ И ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ

7.I. На этом последнем этапе решения задачи (см. рис. 2.2) для множества доминирующих вариантов рассчитывается и анализируется матрица математических ожиданий затрат. Для этого используются экспертные ряды распределения $F_q$ ( $q = 1, \ldots, Q$ ) , намеченные на втором этапе (см. пункт 4.8).

Имея ряд распределения $F_Q(y)$ , можно определить математическое ожидание затрат для того или иного доминирующего варианта решения $x_i$ :

$$M_{iq} = \sum_{s=1}^{S} P_{sq} З_{is} . \qquad (7.I)$$

где значения $З_{is}$ берутся из матрицы затрат $\| З_{is} \|$. Рассчитав $M_{iq}$ для всех доминирующих вариантов $x_i$ ( $i = I, \ldots, I$ ) при всех рядах распределения $F_q$ ( $q = I, \ldots, Q$ ), получим матрицу математических ожиданий затрат $\| M_{iq} \|$ . Строки этой матри-

цы по-прежнему соответствуют различным вариантам решения $x_i$, а столбцы – разным рядам распределения $Fq$, то есть уже не отдельным сочетаниям исходных данных, а всему их множеству с фиксированными вероятностями $\rho_{sq}$ (как иногда говорят, "смешанной стратегии природы"). Значения $M_{iq}$ удобно дописать к матрице затрат в качестве характерных оценок вариантов наряду со значениями $З_i^{max}$ (см.табл. 6.I).

Для иллюстрации в табл. 7.I представлены три ряда распределения вероятностей, как предполагается, для тех же пяти сочетаний исходных данных $y_s$ ($S$ = I,..., 5), которые рассматривались в числовом примере табл.6.2. Как можно судить по цифрам табл.7.I, крайние сочетания информации ($y_1$ и $y_5$) считаются в общем менее вероятными, чем средние сочетания.

Таблица 7.I

Экспертные ряды распределения вероятностей рассмотренных сочетаний информации

| $Fq$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | 0,I | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,I |
| $F_2$ | 0,I | 0,I | 0,2 | 0,4 | 0,2 |
| $F_3$ | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,I | 0,I |

Матрица математических ожиданий затраты, рассчитанная на основе матрицы затрат табл.6.2 с использованием рядов распределения табл.7.I, приведена в табл.7.2. Расчеты производились по формуле (7.I). Для первого варианта решения $x_1$ и первого ряда распределения $F_1$, например, математическое ожидание затрат

$$M_{11} = 0,I \cdot 5 + 0,2 \cdot 2 + 0,4 \cdot 8 + 0,2 \cdot 4 + 0,I \cdot I4 = 6,3,$$

где вероятности брались из верхней строки табл.7.I, а значения затрат – из верхней строки табл. 6.2. Значение 6,3 записано в верхней левой клетке табл. 7.2.

Таблица 7.2

Матрица математических ожиданий затрат

| $x_i$ \ $F_q$ | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ |
|---|---|---|---|
| $x_1$ | 6,3 | 6,7 | 5,2 |
| $x_2$ | 5,6 | 7,7 | 4,4 |
| $x_3$ | 7,0 | 6,0 | 6,6 |
| $x_4$ | 5,4 | 5,2 | 7,I |

7.2. Значения $M_{iq}$ в отдельном столбце могут сопоставляться между собой, что позволяет выявить вариант, оптимальный при соответствующем ряде распределения $F_q$ :

$$\min_i M_{iq} \longrightarrow x_q^*; \quad q = 1, \ldots, Q. \qquad (7.2)$$

Если для всех рядов $F_q$ оптимальным оказался один и тот же вариант (такие случаи вполне возможны), то задача решена - этот вариант и следует рекомендовать для реализации. Учет информации о возможных законах распределения вектора $y$ в подобных случаях фактически снимает неопределенность выбора*.

В противном случае варианты $x_q^*$ следует рассматривать как экономически равноценные. Их нужно передать на завершающую стадию анализа.

В числовом примере табл.7.2 рациональными оказались варианты $x_2$ и $x_4$ .

7.3. На заключительной стадии анализа необходимо определить вариант, наиболее предпочтительный с точки зрения проектировщика, который будет рекомендоваться вышестоящим инстанциям для принятия к реализации. Для этого можно рекомендовать следующие дополнительные операции:

а) сопоставить характерные оценки $3_i^{max}$ (см.пункт 6.4 и табл.6.I) у различных рациональных вариантов $x_q^*$ . Более пред-

* Если бы интуитивным путем намечалось только одно распределение вероятностей исходных данных (что неправомочно), то однозначный выбор получился бы автоматически.

почтителен тот вариант, у которого $З_i^{max}$ меньше; в рассмотренном числовом примере максимальные затраты меньше у варианта $x_4$ (см.табл. 6.2);

б) учесть другие (неэкономические) критерии, которые имеют значение для обосновываемого решения. Из равноэкономичных вариантов $x_q^*$, естественно, следует рекомендовать тот, который лучше по другим критериям (надежности, качеству, экологическим последствиям и т.п.). Такой выбор может осуществляться чисто интуитивным (экспертным) путем либо же специальными, формализованными методами (многокритериальными), здесь не рассматриваемыми.

Наряду с наиболее предпочтительным (рекомендуемым) вариантом решения в вышестоящие инстанции, принимающие окончательные решения, следует передавать также и другие экономически равноценные варианты $x_q^*$ с их характерными оценками, значениями неэкономических показателей и др.

## ЛИТЕРАТУРА


I. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений // Экономическая газета. - 1981. - № 2, № 3.

2. Инструкция по определению экономической эффективности капиталовложений в развитие энергетического хозяйства. - М.: Энергия, 1973. - 54 с.

3. Руководящие указания к использованию замыкающих затрат на топливо и электрическую энергию. - М.: Наука, 1974. - 55 с.

4. Методические положения по выполнению оптимизационных (технико-экономических) расчетов в энергетике при неоднозначности исходной информации. - Москва-Иркутск: Научный совет по комплексным проблемам энергетики, 1977. - 52 с.

Пример I

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВООЧЕРЕДНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ОЭЭС

### I. Постановка задачи

Определение развития конденсационных электростанций (КЭС) является одной из важнейших задач электроэнергетики. Она включает в себя определение рационального состава КЭС, их размещения и последовательности строительства. Данная задача решается при проектировании объединенных электроэнергетических систем после того, как выполнена оптимизация развития энергетического комплекса страны и структуры генерирующих мощностей ЕЭЭС.

Особенность КЭС состоит в том, что они во многих случаях являются замыкающим видом потребителей топлива. Поэтому условия их топливоснабжения оказываются в большой мере неопределенными – они зависят от ресурсов энергетических топлив и от рациональных размеров их потребления другими категориями потребителей (котельные, ТЭЦ и др.).

В отличие от других видов электростанций, местоположение которых является вынужденным (для ТЭЦ – по условиям теплоснабжения потребителей, для ГЭС – по условиям водотоков), конденсационные электростанции (включая атомные) размещаются относительно свободно в пределах значительных территориальных зон ОЭЭС. Поэтому необходимо выбирать рациональное местоположение КЭС (по совокупности экономических, энергетических, инженерно-строительных и экологических факторов).

В данном примере задача ставится как выбор первоочередных КЭС (с учетом их размещения), которые начнут проектироваться и строиться в ближайшей планируемой пятилетке. При этом для правильного учета последствий этих первоочередных решений необходимо рассматривать еще одну или даже две последующие пятилетки.

Варианты решения задачи $x$ являются дискретными и представляют собой наборы конкурирующих первоочередных электростанций (с заданными их мощностями, площадками, видом топлива и т.п.) с указанной последовательностью их строительства.

Неопределенность условий развития ОЭЭС обусловливается следующими главными факторами и показателями (включаемыми в вектор $y$): 1) темпами роста электропотребления; 2) плотностью графиков нагрузки потребителей; 3) возможностями обмена мощностью и энергией со смежными ОЭЭС; 4) ходом строительства и освоения мощностей других электростанций (ГЭС, ТЭЦ, а также КЭС, по которым уже приняты решения о строительстве); 5) условиями топливоснабжения; 6) технико-экономическими показателями электростанций и используемого ими топлива.

Первые четыре фактора определяют потребность во вводах мощности новых КЭС, поэтому могут быть совокупно охарактеризованы одним показателем (см. ниже).

При сопоставлении вариантов решения между собой при различных условиях развития в данной задаче необходимо учитывать возможные корректирующие мероприятия (составляющие вектор $z$). Вид этих мероприятий зависит от реальных способов обеспечения энергетической сбалансированности (и сопоставимости) вариантов развития электростанций. Конкретно предусматривалась возможность следующих корректирующих мероприятий:

а) изменения сроков ввода электростанций и их энергоблоков (при изменении потребности во вводах новых мощностей);

б) реконструкции электростанций, связанной с переводом на другой вид топлива;

в) сверхпроектного получения энергии из смежных ОЭЭС по стоимости, равной замыкающим затратам на электроэнергию, и с дополнительными капиталовложениями на усиление межсистемных связей.

В соответствии с данной постановкой была записана оценочная функция

$$З(x, y, z) = З(x, y) + \Delta З(x, y, z),$$

где $З(x, y)$ - приведенные затраты на производство и распределение электроэнергии (с учетом внутренних электрических сетей ОЭЭС) при заданных вариантах решения $x$ и условиях развития $y$; $\Delta З(x, y, z)$ - дополнительные затраты на корректирующие мероприятия для заданных $x$ и $y$.

Приведенные затраты определялись в динамике за расчетный период 15 лет.

## 2. Отбор представительных условий развития ОЭЭС и оценка их вероятностей

Данный этап решения задачи осуществлялся в три стадии:

I) анализ значимости и оценка диапазонов неопределенности основных исходных показателей;

2) анализ совокупности условий развития и отбор расчетных сочетаний информации на перспективный период;

3) экспертная оценка вероятностей отобранных сочетаний.

На первой стадии проанализировано три группы показателей:

потребность во вводах генерирующей мощности;

условия топливоснабжения электростанций;

технико-экономические показатели.

Потребность во вводах мощностей на новых КЭС ОЭЭС зависит, как уже отмечалось, от годового электропотребления, плотности графика нагрузок, обмена мощностью со смежными системами, мощности электростанций определившегося состава. По каждому из этих показателей в отдельности определены максимальное и минимальное значения для условий данной ОЭЭС по годам I5-летнего периода. Затем была выявлена потребность во вводах мощностей КЭС для двух представительных сочетаний информации (табл. I), полученных экспертным путем (с учетом возможных корреляционных связей между отдельными показателями). Это позволило оценить минимальные и максимальные значения необходимой мощности новых КЭС (табл. 2).

Таблица I

Сочетания исходной информации по потребности во вводах генерирующей мощности КЭС

| Сочетание информации | Уровень электропотребления | Плотность графиков нагрузки | Получение мощности от смежных ОЭЭС | Мощность других электростанций |
|---|---|---|---|---|
| I | минимальный | максимальная | максимальное | минимальная |
| 2 | максимальный | минимальная | минимальное | максимальная |

Условия топливоснабжения ОЭЭС характеризуются значительной неопределенностью, вытекающей из специфики формирования топлив-

Таблица 2

Размеры потребности в генерирующей мощности новых КЭС по годам (фрагмент)

| Сочетание информаций | Потребности по годам, ГВт | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | .... | 5 | .... | I0 | .... | I5 |
| I | I,2 | .... | 2,9 | .... | 7,6 | .... | II,5 |
| 2 | I,2 | .... | 3,4 | .... | I0,0 | .... | I5,6 |

но-энергетического баланса зоны. В качестве топливных ресурсов для электростанций региона рассмотрены природный газ, привозной уголь и ядерное топливо. Масштабы использования указанных энергоресурсов в ОЭЭС выявлялись на основе союзных и региональных балансов топлива для электростанций, определенных в предшествующих работах по развитию ЭК и ЕЭЭС страны.

Экспертный анализ показал, что одновременное наличие всех трех видов топлива в рассматриваемом временном периоде маловероятно. То же самое относится к ситуации, при которой можно рассчитывать только на получение одного из указанных видов топлива. Поэтому в качестве расчетных были приняты сочетания условий, соответствующие наличию двух видов топлива из трех (газ и уголь, газ и ядерное топливо, уголь и ядерное топливо).

Неоднозначность технико-экономических показателей электростанций и топлива было признано возможным не учитывать ввиду относительно небольшого диапазона их неопределенности и ожидаемой их коррелированности (синхронного изменения) у разных видов электростанций. Были приняты осредненные значения соответствующих стоимостных оценок.

В целом с учетом изложенного для дальнейшего рассмотрения отобрано шесть расчетных условий развития ОЭЭС (табл.3).

Намеченные экспертным путем ряды распределения вероятностей реализации рассматриваемых сочетаний информации о потребности в мощности и наличии энергоресурсов приведены в табл. 4.

Ряд $F_1$ предполагает равную возможность реализации всех условий; ряд $F_2$ - бо́льшую возможность реализации минимального уровня потребности в мощности КЭС по сравнению с максимальным при равных возможностях условий обеспечения энергоресурсами, а

Таблица 3

Расчетные условия развития ОЭЭС

| Условия развития $y_s$ | Потребность в мощности новых КЭС | Наличие энергоресурсов | | |
|---|---|---|---|---|
| | | газ | уголь | горючее ядерное |
| $y_1$ | максимальная | есть | есть | нет |
| $y_2$ | максимальная | есть | нет | есть |
| $y_3$ | максимальная | нет | есть | есть |
| $y_4$ | минимальная | есть | есть | нет |
| $y_5$ | минимальная | есть | нет | есть |
| $y_6$ | минимальная | нет | есть | есть |

Таблица 4

Экспертные оценки вероятностей реализации расчетных условий развития ОЭЭС

| $F_q$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| $F_2$ | 0,133 | 0,133 | 0,133 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| $F_3$ | 0,133 | 0,2 | 0,167 | 0,133 | 0,2 | 0,167 |

ряд $F_3$ – бо́льшую возможность наличия ядерного горючего, чем угольного топлива, при равных возможностях реализации рассматриваемых уровней потребности в мощности.

## 3. Составление конкурирующих вариантов сооружения электростанций

Исходя из максимального уровня потребности в новой генерирующей мощности (табл.2), в ближайшем десятилетии необходимо обеспечить ввод около 10 ГВт новых мощностей КЭС. Решения о строительстве двух КЭС уже были приняты ранее: ГРЭС-1 на угле мощностью 4,8 ГВт и ГРЭС-2 на газе мощностью 2,4 или 4,8 ГВт (вопрос о проектной мощности ГРЭС-2 остался открытым). Кроме них в первой пятилетке нужно начать строить еще одну или две КЭС, что-

бы ввести первые их агрегаты во второй пятилетке. Последующие станции уже не являются первоочередными (их строительство начнется только во второй пятилетке).

Следовательно, задача, которую нужно решить, состоит в том, чтобы, во-первых, определить целесообразную проектную мощность ГРЭС-2 (2,4 или 4,8 ГВт) и, во-вторых, выбрать еще одну-две новых КЭС.

Варианты по новым КЭС сформированы, исходя из территориального распределения электрических нагрузок, условий топливоснабжения и наличия благоприятных площадок. Территория ОЭЭС была разбита на три зоны: южную, восточную и северную. Виды топлива для новых электростанций в этих зонах определены на основе разработок по рациональному районированию топливных ресурсов: в южной зоне - ядерное горючее и природный газ, в восточной - уголь и природный газ, в северной - природный газ. В северной зоне строительство новой КЭС (на газе) было признано в ближайшее время нецелесообразным из-за общей недостаточной хозяйственной освоенности территории. В каждой из остальных двух зон подобрано по одной площадке для новой КЭС.

В результате рассмотрения совокупности факторов, влияющих на развитие и размещение электростанций, составлено четыре варианта по составу и очередности строительства КЭС, характеристики которых приводятся в табл. 5. В вариантах $x_3$ и $x_4$ ГРЭС-2 имеет сниженную мощность, вследствие чего в рассматриваемом 15-летнем периоде необходимо строительство обеих новых КЭС (но последовательность их строительства может быть разной).

## 4. Расчет и анализ матрицы затрат

Для каждого из намеченных четырех вариантов решения были определены приведенные затраты на развитие электростанций и электрических сетей ОЭЭС при всех шести отобранных сочетаниях условий развития. В этих расчетах предусматривались следующие корректирующие мероприятия:

1) замедление строительства и вводов электростанций в условиях $y_4$, $y_5$ и $y_6$, характеризующихся пониженной потребностью в новых мощностях по сравнению с условиями $y_1$, $y_2$ и $y_3$;

2) реконструкция новой КЭС-1, нормально запроектированной на уголь, для перевода ее на газ при условиях $y_2$ и $y_5$ (строящие-

Таблица 5

Характеристика конкурирующих вариантов сооружения первоочередных КЭС

| Состав электростанций | Топливо | Мощность, ГВт | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | проектная | по годам | | |
| | | | 5-й | 10-й | 15-й |
| Вариант $x_1$ | | 16,0 | 4,0 | 10,4 | 15,2 |
| Строящаяся ГРЭС-1 | уголь | 4,8 | 2,4 | 4,8 | 4,8 |
| Строящаяся ГРЭС-2 | газ | 4,8 | 1,6 | 4,8 | 4,8 |
| Новая КЭС-1 (Восточная) | газ, уголь | 6,4 | - | 0,8 | 5,6 |
| Вариант $x_2$ | | 15,6 | 4,0 | 10,6 | 15,6 |
| Строящаяся ГРЭС-1 | уголь | 4,8 | 2,4 | 4,8 | 4,8 |
| Строящаяся ГРЭС-2 | газ | 4,8 | 1,6 | 4,8 | 4,8 |
| Новая КЭС-2 (Южная) | ядерное | 6,0 | - | 1,0 | 6,0 |
| Вариант $x_3$ | | 18,0 | 4,0 | 9,6 | 15,0 |
| Строящаяся ГРЭС-1 | уголь | 4,8 | 2,4 | 4,8 | 4,8 |
| Строящаяся ГРЭС-2 | газ | 2,4 | 1,6 | 2,4 | 2,4 |
| Новая КЭС-1 | газ,уголь | 4,8 | - | 2,4 | 4,8 |
| Новая КЭС-2 | ядерное | 6,0 | - | - | 3,0 |
| Вариант $x_4$ | | 18,0 | 4,0 | 9,2 | 15,6 |
| Строящаяся ГРЭС-1 | уголь | 4,8 | 2,4 | 4,8 | 4,8 |
| Строящаяся ГРЭС-2 | газ | 2,4 | 1,6 | 2,4 | 2,4 |
| Новая КЭС-1 | газ,уголь | 4,8 | - | - | 2,4 |
| Новая КЭС-2 | ядерное | 6,0 | - | 2,0 | 6,0 |

Примечание: мощности электростанций по годам приводятся при максимальном уровне развития КЭС.

ся ГРЭС-1 и ГРЭС-2 всегда обеспечиваются проектным топливом);

3) задержка ввода новой КЭС-2 на одну пятилетку при условиях $y_1$ и $y_4$ со строительством дополнительной связи с соседней ОЭЭС и некоторым ускорением (и удорожанием) строительства новой КЭС-1; такая корректировка объясняется тем, что при условиях $y_1$ и $y_4$ во второй пятилетке в данной ОЭЭС не имеется возможности

обеспечить АЭС оборудованием и топливом, поэтому необходимо компенсировать недостаток мощности и энергии поставками из смежных ОЭЭС и ускорением, насколько это возможно, ввода новой КЭС-I на угле; в третьей пятилетке ограничения на ввод АЭС снимаются.

Полученная в результате таких расчетов матрица представлена в табл.6 (ее элементы характеризуют приведенные затраты за 15-летний период для соответствующих вариантов $x_i$ и $y_s$).

Таблица 6

Матрица затрат, млн.руб.

| $x_i$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $3_i^{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | I380,6 | I4I8,0 | I3I4,8 | I240,0 | I266,2 | I236,8 | - |
| $x_2$ | I393,2 | I324,0 | I286,5 | I285,8 | I25I,5 | I2I4,0 | - |
| $x_3$ | I349,4 | I30I,3 | I203,2 | II89,6 | I227,2 | II99,6 | I349,4 |
| $x_4$ | I352,0 | I263,0 | II84,3 | II92,2 | II26,5 | II64,0 | I352,0 |

Сопоставление элементов платежной матрицы по столбцам позволяет судить о сравнительной экономической эффективности рассматриваемых вариантов при различных условиях развития ОЭЭС. Анализ показывает, что варианты $x_1$ и $x_2$ при всех расчетных условиях имеют более высокие приведенные затраты, чем варианты $x_3$ и $x_4$. Поэтому для дальнейшего рассмотрения оставлены только последних два варианта, являющихся доминирующими. Для них определены максимальные значения затрат $3_i^{max}$.

## 5. Расчеты матрицы математических ожиданий и выработка рекомендаций

Для доминирующих вариантов $x_3$ и $x_4$ были рассчитаны математические ожидания затрат при трех экспертных рядах распределения вероятностей, намеченных в разделе 2 (см.табл.4). Эти значения математических ожиданий вместе с максимальными затратами приведены в табл.7

Анализируя данные табл.7, можно видеть, что по математическому ожиданию затрат при всех рассмотренных рядах распределения вероятностей наилучшим является вариант $x_4$. При этом он несколько хуже варианта $x_3$ по максимальным затратам, но разница значений $3_i^{max}$ мала и не принципиальна.

Таблица 7

Характерные оценки вариантов, млн.руб.

| $x_i$ | $M_{i1}$ | $M_{i2}$ | $M_{i3}$ | $3_i^{max}$ |
|---|---|---|---|---|
| $x_3$ | I245,I | I235,8 | I244,6 | I349,4 |
| $x_4$ | I2I3,7 | I20I,0 | I208,4 | I352,0 |

Следовательно, на основе проведенного анализа можно достаточно уверенно рекомендовать для реализации вариант $x_4$, то есть принятие для ГРЭС-2 проектной мощности 2,4 млн.кВт и выбор новой КЭС-2 (АЭС в южной зоне) в качестве первоочередной для последующего строительства в данной ОЭЭС. Такой результат объясняется, главным образом, высокими замыкающими затратами на природный газ, на который ориентированы ГРЭС-2 и частично новая КЭС-I

Пример 2

## ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

### I. Постановка задачи

Выбор источников теплоты - одна из основных задач, решаемых при проектировании систем централизованного теплоснабжения городов. В общем случае она включает в себя: а) выбор вида источников теплоснабжения (ТЭЦ, центральная или районные котельные); б) выбор тепловой мощности и состава основного оборудования теплоисточников; в) определение диаметров тепловых сетей от источников централизованного теплоснабжения.

Данная задача решается, как правило, при разработке схемы теплоснабжения города, в которой обосновываются указанные технические решения на перспективу I0-I5 лет. Учитывая неоднозначность основных исходных данных, определяющих выбор теплоисточников, решение задачи, как правило, осуществляется поэтапно. На первом этапе выбирается вид источников теплоснабжения и предварительно намечаются их тепловая мощность и состав основного оборудования, а также диаметры тепловых сетей. На последующих этапах на основе уточненных исходных данных окончательно принимаются решения по основным параметрам теплоисточников и тепловых сетей.

В данном примере рассматривается только задача первого этапа - выбор вида источников теплоснабжения. Варианты по составу основного оборудования теплоисточников и диаметрам тепловых сетей лишь имитируются (варьируясь) в процессе решения этой задачи в зависимости от отобранных сочетаний исходных данных.

Рассматриваемый конкретный пример характеризуется следующими особенностями (см. расчетную схему системы на рис. I):

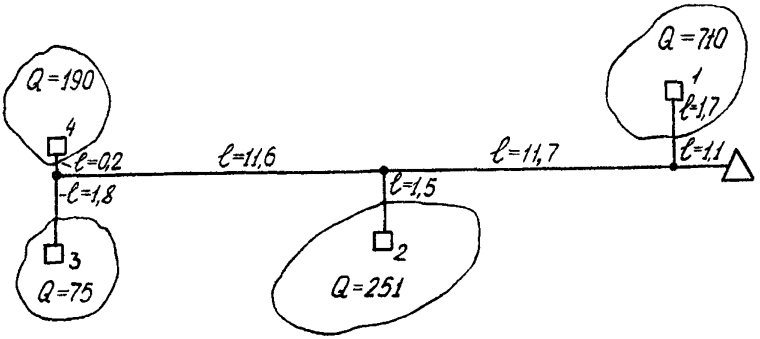



Рис. I. Расчетная схема системы теплоснабжения. $\Delta$ - площадка источника централизованного теплоснабжения; $\square$ - возможные площадки районных котельных с номерами районов; $\ell$ = = I,I - длина участков сети, км; $Q$ = 7I0 - тепловая нагрузка района, Гкал/ч

I) город расположен в Восточной Сибири и состоит из четырех районов, тепловые нагрузки которых на расчетном уровне указаны на рис. I;

2) заданы возможные площадки для сооружения источников теплоснабжения; в качестве централизованного источника может быть выбрана либо ТЭЦ, либо центральная котельная с различными тепловыми мощностями (с различной степенью охвата тепловых районов), причем в общем случае площадки сооружения ТЭЦ и центральной котельной могут быть различными, но в нашем примере для них предусмотрена одна и та же площадка; площадки районных котельных соответствуют либо существующим, которые могут расширяться, либо вновь проектируемым районным котельным;

3) выбраны трассы и способы прокладки тепловых сетей от центрального источника до площадок районных котельных; распределительные сети в тепловых районах не рассматриваются, так как технические решения и затраты по этим сетям не зависят от вида теплоисточника;

4) город расположен в зоне действия ОЭЭС, которая является источником замещаемой электроэнергии для вариантов с раздельной схемой энергоснабжения;

5) задан перечень типоразмеров основного оборудования (котлов и турбин), которое может быть установлено на проектируемой ТЭЦ или в центральной котельной, а также в новых и расширяемых районных котельных;

6) задача решается без учета динамики для временного уровня, соответствующего концу расчетного периода; такое упрощение объясняется тем, что, как показали специальные исследования, динамика роста тепловых нагрузок в течение расчетного периода практически не оказывает влияния на выбор вида и состава основного оборудования источников теплоты. Вместе с тем, при уточнении сроков ввода основного оборудования ТЭЦ и параметров тепловых сетей на последующих этапах проектирования, как правило, целесообразно учитывать темпы роста нагрузок;

7) доля паровой нагрузки промышленных предприятий, располагаемых в городе, невелика; поэтому в примере рассматривается задача выбора теплоисточников только для водяной системы.

В данной задаче имеется три конкурирующих варианта решения. Первый вариант ($x_1$) - децентрализованное теплоснабжение, при котором каждый район снабжается либо от имеющейся районной котельной при соответствующем ее расширении, либо от проектируемой районной котельной (в новых районах). Варианты $x_2$ и $x_3$ предполагают, соответственно, сооружение ТЭЦ или центральной котельной на площадке центрального теплоисточника.

Мощности ТЭЦ и центральной котельной во втором и третьем вариантах (а также состав их оборудования и диаметры отходящих трубопроводов) могут быть различными в зависимости от числа подключаемых районов и величины тепловой нагрузки. Эти параметры фактически используются для адаптации обосновываемого решения в данной задаче - они варьируются в соответствии с рассматриваемыми сочетаниями исходных данных. Окончательный выбор их значений, как уже отмечалось, производится позднее (после решения данной задачи).

## 2. Отбор представительных сочетаний исходной информации и оценка их вероятностей

Процесс отбора представительных сочетаний исходной информации (условий развития) слагался из нескольких стадий:

I) анализ исходных данных и отбор существенных показателей, неопределенность которых следует учитывать в расчетах;

2) определение возможных диапазонов изменения и "расчетных" значений существенных показателей;

3) оценка возможных вероятностей этих "расчетных" значений;

4) отбор представительных сочетаний значений существенных показателей;

5) составление экспертных рядов распределения вероятностей для отобранных сочетаний.

1-я стадия. Для решения данной задачи требуется значительное количество исходных данных:

а) о величине и структуре расчетных тепловых нагрузок районов теплопотребления;

б) о технических характеристиках котлов и турбин, намечаемых к установке, для всех видов источников теплоты, а также трубопроводов и насосных установок тепловых сетей;

в) об удельных капиталовложениях и эксплуатационных расходах для источников теплоты и тепловых сетей, а также о замыкающих затратах на топливо для ТЭЦ и котельных и на электроэнергию, вырабатываемую на базисных и пиковых электростанциях;

г) о требуемых параметрах сетевой воды у потребителей и допустимых ее параметрах в различных элементах системы теплоснабжения, определяемых техническими характеристиками оборудования.

Всего решение данной задачи для системы с четырьмя районами теплопотребления требует подготовки более 200 исходных показателей, причем подавляющее большинство из них имеют ту или иную степень неоднозначности. Опыт технико-экономических расчетов по выбору источников централизованного теплоснабжения показал, что существенными исходными показателями, неоднозначность которых оказывает наибольшее влияние на результаты расчетов, являются:

1) суммарная расчетная тепловая нагрузка потребителей;

2) капиталовложения в источники тепла и тепловые сети;

3) замыкающие затраты на топливо для ТЭЦ и котельных;

4) замыкающие затраты на электроэнергию в рассматриваемой ОЭЭС.

Остальные исходные показатели можно задавать детерминированно на уровне наиболее вероятных значений, обычно принимаемых в проектных расчетах.

2-я стадия. Диапазоны изменения (крайние "расчетные" значения) существенных исходных показателей выбирались путем умножения тех детерминированных значений этих показателей, которые принимаются

при расчетах без учета неоднозначности информации (в данном примере эти значения взяты в качестве средних), на относительные коэффициенты, приведенные в табл. I.

Таблица I

Относительные диапазоны изменения существенных исходных показателей

| | Значение показателя | | |
|---|---|---|---|
| | пониженное | среднее | повышенное |
| Суммарная тепловая нагрузка районов | 0,6 | I,0 | I,2 |
| Удельные капиталовложения в ТЭЦ, котельные и тепловые сети | 0,9 | I,0 | I,4 |
| Замыкающие затраты на электроэнергию | 0,9 | I,0 | I,3 |
| Замыкающие затраты на топливо | 0,8 | I,0 | I,4 |

Детерминированные (средние) значения существенных показателей определяются следующими способами:

I) суммарные расчетные тепловые нагрузки - по данным местных плановых органов об ожидаемом росте населения и намечаемом строительстве жилых и общественных зданий, а также по данным проектных организаций о расчетных тепловых нагрузках промышленных предприятий на рассматриваемую перспективу;

2) капиталовложения в источники тепла - по показателям объектов-аналогов или по справочно-нормативным данным;

3) показатели замыкающих затрат на топливо и электроэнергию - по справочно-нормативным данным.

При выборе "расчетных" значений учитывалось, что в практике проектирования чаще происходит завышение расчетных тепловых нагрузок и занижение капиталовложений в энергетические объекты. Кроме того, учитывалась тенденция увеличения стоимости топлива. Этими соображениями определяется разница коэффициентов в табл.I для пониженных и повышенных значений различных исходных показателей.

3-я стадия. Экспертная оценка вероятностей "расчетных" значений существенных показателей, указанных в табл.I, производилась

диапазонами. При этом учитывались уже отмечавшиеся тенденции завышения или занижения соответствующих показателей при проектировании и планировании. Принятые диапазоны вероятностей приведены в табл.2.

Можно видеть, что ввиду тенденции к завышению тепловых нагрузок вероятности реализации их пониженного уровня приняты больше, чем для повышенного. Для удельных капиталовложений и замыкающих затрат на топливо и электроэнергию картина обратная, причем для капиталовложений вероятность пониженных значений меньше, чем повышенных. При этом средние значения всех существенных показателей имеют наибольшую вероятность.

Таблица 2

Экспертные оценки вероятностей "расчетных" значений существенных показателей

| | Значение показателя | | |
|---|---|---|---|
| | пониженное | среднее | повышенное |
| Уровень тепловой нагрузки | 0,2-0,4 | 0,4-0,6 | 0,1-0,3 |
| Удельные капиталовложения в источники теплоты и тепловые сети | 0,1-0,3 | 0,4-0,6 | 0,2-0,4 |
| Замыкающие затраты на топливо и электроэнергию | 0,1-0,3 | 0,4-0,6 | 0,2-0,4 |

4-я стадия. В настоящем примере отобрано пять сочетаний условий развития системы теплоснабжения:

1) при пониженных значениях тепловых нагрузок и при средних значениях остальных существенных показателей (см.табл.1); такие условия соответствуют возможному сокращению планов промышленного и жилищно-коммунального строительства;

2) при средних значениях всех показателей;

3) при повышенных значениях капиталовложений в источники тепла и в тепловые сети при средних значениях остальных показателей; такие условия предполагают удорожание объектов в процессе рабочего проектирования;

4) при значениях существенных показателей, благоприятных для теплофикации (сооружения ТЭЦ);

Таблица 3

Значения существенных исходных показателей для
отобранных сочетаний условий развития системы теплоснабжения

| № пп | | Условия развития | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ |
| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| I. | Суммарная тепловая нагрузка районов, Гкал/ч | 730 | I226 | I226 | I470 | 730 |
| 2. | Капиталовложения в ТЭЦ для установки турбины Т-I75-I30 (головная/последующая), млн.руб. | 47,4/32,5 | 47,4/32,5 | 66,4/45,5 | 42,6/29,2 | 66,4/45,5 |
| 3. | То же для энергетического котла (головной/последующий), млн.руб. | 26,2/I5,7 | 26,2/I5,7 | 36,7/22,0 | 23,6/I4,I | 36,7/22,0 |
| 4. | То же для водогрейного котла (последующий), млн.руб. | 3,I | 3,I | 4,3 | 2,7 | 4,3 |
| 5. | Капиталовложения в котельные для установки котла КВТК/30 (головной/последующий), млн.руб. | 4,7/I,2 | 4,7/I,2 | 6,6/I,7 | 6,6/I,7 | 4,3/I,I |

Окончание табл.3

| I | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6. | Удельные капиталовложения в тепловые сети для двухтрубного участка $D$ = 800 мм при подземной прокладке в непроходных каналах, млн.руб./км | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,45 | 0,7 |
| 7. | Замыкающие затраты на топливо (для ТЭЦ / для котельных), руб./т у.т. | 23,4/23,4 | 23,4/23,4 | 23,4/23,4 | I8,7/32,8 | 32,8/I8,7 |
| 8. | Замыкающие затраты на электроэнергию (базисную /пиковую), руб/МВт.ч | I7,9/35,5 | I7,9/35,5 | I7,9/35,5 | 23,4/46,I | I6,I/32,0 |

Примечания: I. Капиталовложения приведены в ценах I984 г.

2. Капиталовложения в строках 5 и 6 даны в качестве примеров - фактически рассматривались также другие типы котлов и способы исполнения участков тепловых сетей.

5) при значениях показателей, более благоприятных для сооружения центральной котельной.

Значения варьируемых показателей для указанных условий приведены в табл. 3.

В принципе, для более обоснованного выбора решения следовало бы рассмотреть и некоторые другие сочетания условий. Однако в целях сокращения объема расчетов рассмотрены только указанные пять условий.

5-я стадия. При оценке вероятностей отобранных сочетаний условий было решено наметить два ряда распределения вероятностей, один из которых ( $F_1$ ) более благоприятен для комбинированной схемы теплоснабжения, а другой ( $F_2$ ) - для раздельной.

Вероятность средних условий ($y_2$) в обоих рядах распределения принята наибольшей и одинаковой. Что касается остальных сочетаний условий, то для ряда $F_1$ (благоприятного для ТЭЦ) увеличена вероятность условий $y_4$ (значения показателей, благоприятные для ТЭЦ). Для ряда $F_2$, наоборот, увеличены вероятности условий $y_1$, $y_3$ и $y_5$, менее благоприятных для ТЭЦ.

Учитывая, что отобрано только пять сочетаний исходных данных (тогда как при полном переборе "расчетных" значений существенных показателей число сочетаний составило бы несколько сот), строго выдерживать правило перемножения вероятностей значений отдельных показателей при определении вероятности их сочетания не имеет смысла. Это правило принималось во внимание лишь как общая тенденция в соотношениях вероятностей различных сочетаний.

С учетом указанных соображений получены два ряда распределения, приведенных в табл.4.

Таблица 4

Экспертные ряды распределения вероятностей сочетаний условий

| $F_q$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | 0,10 | 0,40 | 0,10 | 0,30 | 0,10 |
| $F_2$ | 0,15 | 0,40 | 0,15 | 0,10 | 0,20 |

Значения вероятностей для всех сочетаний условий намного выше тех, которые были бы получены перемножением вероятностей

соответствующих значений отдельных показателей. Это увеличение вероятностей сделано для того, чтобы их сумма в каждом ряде распределения равнялась единице. Тем самым каждое из пяти сочетаний условий $y_5$ становится представителем также многих других, не рассмотренных сочетаний.

### 3. Расчет и анализ матрицы затрат

В качестве оценочной функции приняты суммарные приведенные затраты по всем элементам системы теплоснабжения, показатели которых меняются в зависимости от варианта решения и сочетания условий:

$$З = З_{цит} + З_{рк} + З_{тс} + З_{оээс},$$

где слагаемые выражают последовательно затраты в центральный источник тепла, районные котельные, в тепловые сети и на производство и транспорт электроэнергии в ОЭЭС (последние учитываются только при раздельной схеме энергоснабжения).

Для определения затрат использовалась математическая модель, разработанная в СЭИ СО АН СССР для оптимизации систем централизованного теплоснабжения. В зависимости от рассчитываемого конкурирующего варианта решения в модели предусматривалось отсутствие централизованного источника теплоты ( $x_1$ ), строительство ТЭЦ ( $x_2$ ) или центральной котельной ( $x_3$ ). Для каждой из этих предпосылок по модели определялись производительность и состав основного оборудования ТЭЦ и котельных, а также диаметры тепловых сетей, оптимальные при различных отобранных сочетаниях условий $y_1$ , $y_2$ , ..., $y_5$. При этом для вариантов с ТЭЦ и центральной котельной определялся (каждый раз) оптимальный состав присоединяемых к ним районов города.

Следовательно, в данной задаче не возникала необходимость в рассмотрении каких-либо специальных (непроектных) корректирующих мероприятий. Подстройка конкурирующих вариантов решения под различные сочетания условий развития системы теплоснабжения обеспечивалась за счет обычных мероприятий (решений), которые в окончательном виде будут обосновываться позднее.

Из полученных значений оценочной функции для всех вариантов решения и условий составлена матрица затрат (табл. 5).

Таблица 5

Матрица затрат и характерные оценки вариантов, млн.руб/год

| $x$ \ $y$ | Матрица затрат | | | | | Характерные оценки | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $3_i^{max}$ | $M_{i1}$ | $M_{i2}$ |
| $x_1$ | 74,7 | II4,2 | II4,2 | I62,I | 77,2 | - | - | - |
| $x_2$ | 60,3 | 88,3 | I03,6 | 99,9 | 74,7 | I03,6 | 89,2 | 84,3 |
| $x_3$ | 7I,0 | I06,9 | I08,8 | I6I,5 | 7I,8 | I6I,5 | II6,4 | I00,2 |

Анализ этой матрицы показывает, что при условиях $y_1$, $y_2$, $y_3$ и $y_4$ оптимальным источником теплоты является ТЭЦ с различной тепловой и электрической мощностью и лишь при сочетании $y_5$ наиболее эффективно сооружение центральной котельной с присоединением к ней всех тепловых районов.

Таким образом, варианты $x_2$ и $x_3$ являются локально-оптимальными, а поэтому и доминирующими. Вариант $x_1$ оказался недоминирующим, так как при всех условиях над ним доминирует вариант $x_3$. Поэтому он исключается из дальнейшего рассмотрения.

## 4. Анализ математических ожиданий затрат и рекомендации

Характерные оценки вариантов, включая математические ожидания затрат, подсчитанные для экспертных рядов распределения $F_1$ и $F_2$ (табл.4), приведены в правой части табл. 5.

Можно видеть, что при обоих рядах распределения (колонки $M_{i1}$ и $M_{i2}$) оптимален вариант $x_2$ (строительство ТЭЦ). Этот же вариант имеет меньшие максимальные затраты $3_i^{max}$. Поэтому в данном примере можно уверенно рекомендовать наиболее прогрессивную форму централизованного теплоснабжения - теплофикацию, при которой теплоисточником является ТЭЦ.

Пример 3

## ВЫБОР УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ГЭС*

### I. Постановка задачи

Данная задача - одна из основных, решаемых при проектировании

* Пример составлен с участием И.Г.Кантаровича

ГЭС. Учитывая, что энергоотдача ГЭС ограничена гидрологическими условиями реки в створе сооружения, увеличение или уменьшение установленной мощности приводит к соответствующему изменению режимов работы и числа часов использования мощности ГЭС. Чрезмерное увеличение установленной мощности ГЭС может привести к ее недоиспользованию из-за ограниченности гидроресурсов и к неоправданным затратам.В связи с этим установленная мощность новых ГЭС должна выбираться с учетом реальных условий использования их в электроэнергетической системе (структуры существующих электростанций, плотности графиков нагрузки потребителей, связей с другими ЭЭС и т.п.).

Рассматриваемая задача решается обычно при достаточно хорошей проработанности проекта ГЭС - после выбора схемы гидросооружений, параметров плотины (нормального подпорного горизонта и уровня сработки водохранилища) и типоразмеров гидроагрегатов, а также после проведения необходимых водноэнергетических расчетов. Поэтому фактически задача выливается в выбор рационального числа агрегатов заданной мощности. При этом технико-экономические показатели самой ГЭС известны с достаточной точностью и основную неопределенность в решение задачи вносят внешние (системные) условия (для учета случайного характера речного стока применяются хорошо отработанные приемы - принятие участия ГЭС в балансе мощностей ЭЭС по гарантированной отдаче, соответствующей маловодным условиям расчетной обеспеченности, а в балансе энергии - по среднемноголетней выработке ГЭС).

Ниже будет рассмотрено решение данной задачи на примере Средне-Енисейской ГЭС в ОЭЭС Сибири. Расчеты проводились в соответствии с "Методическими указаниями по определению экономической эффективности капитальных вложений при проектировании гидроэнергетических объектов" (Минэнерго, ГлавНИИпроект, 1981, 36 с.) на основе проектно-сметных материалов. Оценочная функция включала три составляющих приведенных затрат:

$$З = З_{гэс} + З_{эп} + З_{зам}, \qquad (1)$$

где $З_{гэс}$ - переменная (зависящая от установленной мощности) часть приведенных затрат в гидроэлектростанцию; $З_{эп}$ - то же в линии электропередачи для выдачи мощности ГЭС; $З_{зам}$ - приведенные затраты в заменяемую электростанцию (для компенсации изменения мощности ГЭС).

Последнее слагаемое ( $З_{зом}$ ) обеспечивает приведение вариантов к одинаковому энергетическому эффекту, и каких-либо других корректирующих мероприятий в данной задаче не требуется.

Варианты решения являются дискретными (соответствующими разному числу агрегатов). Исходя из реалистических представлений о минимально и максимально возможной целесообразной установленной мощности Средне-Енисейской ГЭС, выбор осуществлялся в диапазоне 13-18 агрегатов. При единичной мощности агрегата 375 МВт это соответствует изменению установленной мощности ГЭС от 4875 до 6750 МВт.

## 2. Отбор представительных сочетаний исходных данных и оценка их вероятностей

На величину установленной мощности Средне-Енисейской ГЭС наибольшее влияние оказывают такие неопределенные в перспективе факторы, как характер режима электропотребления (плотность суточных графиков нагрузки), возможность сооружения межсистемных связей, стоимостные характеристики заменяемого источника электроснабжения.

В соответствии с этим в данном примере в качестве основных варьируемых факторов рассматривались:

1. Отсутствие или наличие межсистемной ВЛ-1150 кВ для передачи мощности проектируемой ГЭС в ОЭЭС Урала.

В настоящее время нельзя однозначно определить срок строительства такой ЛЭП. Практически это должна быть вторая цепь ВЛ-1150 кВ из Сибири на Урал, так как первая цепь будет полностью использована для реализации эффекта от объединения систем и выдачи пиковых мощностей ранее построенных ГЭС.

Характерные особенности ОЭЭС Сибири - большая плотность суточных графиков нагрузки, существенный удельный вес ГЭС в структуре генерирующих мощностей - сдерживают использование мощности Средне-Енисейской ГЭС в ОЭЭС Сибири. При сооружении между ОЭЭС Сибири и Урала второй межсистемной связи напряжением 1150 кВ использование мощности этой ГЭС значительно ускоряется вследствие меньшей плотности суточных графиков нагрузки и малой доли ГЭС в структуре мощностей ОЭЭС Урала.

2. Различная плотность суточных графиков электрической нагрузки в ОЭЭС Урала (в ОЭЭС Сибири графики нагрузки достаточно стабильны и не варьировались).

Плотность суточных графиков нагрузки зависит от перспективных уровней электропотребления, темпов роста нагрузок, структуры промышленных и коммунально-бытовых потребителей электроэнергии, которые в большой мере неопределенны. При более плотных графиках установленная мощность ГЭС будет использоваться в меньшей степени, то есть ее энергетический эффект будет меньше, чем при разуплотненных графиках.

3. Различная стоимость (удельные затраты) заменяемой ТЭС на Урале (в ОЭЭС Сибири вид заменяемой ТЭС хорошо известен - это ГРЭС КАТЭКа).

При использовании мощности ГЭС в ОЭЭС Урала в качестве заменяемой электростанции может оказаться либо полупиковая ТЭС на газе, либо полупиковая или даже базисная ТЭС на твердом топливе.

Отсутствие в настоящее время достаточной ясности в формировании топливного баланса электростанций ОЭЭС Урала, а также в технико-экономических показателях полупиковых электростанций не позволяет однозначно определить стоимостные показатели заменяемых ТЭС. Поэтому в данных расчетах рассматривалось два варианта удельной стоимости заменяемой ТЭС - 250 и 180 руб./кВт.

В результате анализа исходной информации было сформировано пять сочетаний условий:

использование мощности Средне-Енисейской ГЭС только в ОЭЭС Сибири;

использование мощности ГЭС при объединении ОЭЭС Сибири и Урала, графиках средней плотности и удельной стоимости заменяемой ТЭС 250 руб./кВт;

то же, но при удельной стоимости заменяемой ТЭС 180 руб./кВт;

использование мощности ГЭС в условиях объединения при разуплотненных графиках и удельной стоимости заменяемой ТЭС 250 руб./кВт;

то же, но при удельной стоимости заменяемой ТЭС 180 руб./кВт.

Возможные вероятности этих сочетаний определялись на основе анализа вероятностей каждого из трех варьируемых факторов. Экспертная их оценка показала следующее:

1) вероятность создания второй межсистемной связи с ОЭЭС Урала оценена в диапазоне $\rho_1 = 0{,}6 \div 0{,}8$, а отсутствия связи - $(1-\rho_1) = 0{,}4 \div 0{,}2$;

2) вероятность реализации средней плотности графиков нагрузки

ОЭЭС Урала принимается в диапазоне $\rho_2$ = 0,5÷0,7, разуплотненных графиков $(I-\rho_2)$ = 0,5÷0,3;

3) вероятности реализации высокой и низкой стоимости заменяемой электростанции на Урале считаются примерно одинаковыми в диапазонах $\rho_3$ = 0,4÷0,6; $(I-\rho_3)$ = 0,6÷0,4.

Учитывая, что плотность графиков нагрузки и стоимость заменяемой электростанции варьируются только для условий наличия связи с Уралом, вероятность первого отобранного сочетания условий ( $y_1$ ) равна вероятности отсутствия второй цепи ВЛ-II50 кВ, а вероятности остальных сочетаний условий должны определяться как произведение соответствующих вероятностей трех варьируемых факторов.

Для получения рядов распределения вероятностей сочетаний условий рассмотрены две крайние ситуации в отношении вероятностей реализации варьируемых факторов (в пределах принятых диапазонов вероятностей):

Ситуация I - все вероятности имеют значения, наиболее благоприятные для увеличения мощности ГЭС - $\rho_1$ = 0,8; $\rho_2$ = 0,5; $\rho_3$ = 0,6.

Ситуация 2 - все вероятности имеют значения, наименее благоприятные для увеличения мощности ГЭС - $\rho_1$ = 0,6; $\rho_2$ = 0,7; $\rho_3$ = 0,4.

Указанным ситуациям соответствуют ряды распределения вероятностей, приведенные в табл. I.

Таблица I

Экспертные ряды распределения вероятностей условий

| $F_q$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $F_1$ | 0,20 | 0,24 | 0,I6 | 0,24 | 0,I6 |
| $F_2$ | 0,40 | 0,I68 | 0,252 | 0,072 | 0,I08 |

Поясним процесс определения вероятностей сочетаний на примере ситуации I (ряд распределения $F_1$ ).

Вероятность сочетания $y_1$ (использование ГЭС только в ОЭЭС Сибири) равна, как уже отмечалось, вероятности отсутствия связи с Уралом - $(I-\rho_1)$ = I - 0,8 = 0,2.

Для сочетания условий $y_2$ вероятность определяется как произведение вероятностей событий: наличия связи с Уралом ( $\rho_1$ = = 0,8), реализации графиков нагрузки средней плотности ( $\rho_2$ = = 0,5) и высокой стоимости заменяемой ТЭС ( $\rho_3$ = 0,6), то есть

$$p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 = 0{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}6 = 0{,}24.$$

Вероятность условий $y_3$ отличается только вследствие иной вероятности реализации низкой стоимости заменяемой ТЭС:

$$p_1 \cdot p_2 \cdot (1 - p_3) = 0{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}4 = 0{,}16.$$

Аналогично определены вероятности для сочетаний условий $y_4$ и $y_5$, а также ряд распределения $F_2$.

### 3. Расчет и анализ матрицы затрат

Значения слагаемых оценочной функции (I), полученные для различных вариантов решения и сочетаний условий, приведены в табл.2–4.

Таблица 2

Дополнительная мощность и затраты по ГЭС, млн.руб./год

| Вариант решения | Количество устанавливаемых агрегатов | Дополнительная мощность ГЭС, МВт | Требующаяся мощность заменяемых ТЭС, МВт | Дополнительные приведенные затраты в ГЭС, млн.руб./год |
|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | 13 | 375 | 1875 | 4,09 |
| $x_2$ | 14 | 750 | 1500 | 8,18 |
| $x_3$ | 15 | 1125 | 1125 | 11,91 |
| $x_4$ | 16 | 1500 | 750 | 15,64 |
| $x_5$ | 17 | 1875 | 375 | 19,83 |
| $x_6$ | 18 | 2250 | 0 | 24,0 |

Таблица 3

Приведенные затраты по ВЛ-1150 кВ, млн.руб./год

| Вариант решения | Сочетания условий | | |
|---|---|---|---|
| | $y_1$ | $y_2$, $y_3$ | $y_4$, $y_5$ |
| $x_1$ | 0 | 3,26 | 4,43 |
| $x_2$ | 0 | 6,28 | 8,86 |
| $x_3$ | 0 | 9,07 | 12,96 |
| $x_4$ | 0 | 11,46 | 16,76 |
| $x_5$ | 0 | 13,69 | 20,43 |
| $x_6$ | 0 | 15,51 | 23,83 |

Таблица 4

Приведенные затраты по заменяемым ТЭС, млн.руб./год

| Вариант решения | Мощность заменяемых ТЭС, МВт | Сочетания условий | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ |
| $x_1$ | 1875 | 26,22 | 27,88 | 20,13 | 42,13 | 30,14 |
| $x_2$ | 1500 | 18,75 | 20,41 | 13,72 | 31,82 | 21,74 |
| $x_3$ | 1125 | 12,66 | 13,83 | 8,42 | 22,31 | 14,37 |
| $x_4$ | 750 | 7,59 | 8,35 | 4,48 | 13,99 | 8,44 |
| $x_5$ | 375 | 3,5 | 3,68 | 1,71 | 6,62 | 3,78 |
| $x_6$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

В табл.2 даны энергетические и стоимостные показатели по установке дополнительных агрегатов на ГЭС (по сравнению с 12 агрегатами). В табл.3 указаны затраты по межсистемной связи с ОЭЭС Урала с учетом различных сроков ее сооружения (зависящих от плотности графиков нагрузки) при удельных капиталовложениях в ЛЭП в размере 150 руб./кВт. Стоимость электропередач для выдачи мощности Средне-Енисейской ГЭС в ОЭЭС Сибири учтена в затратах по ГЭС. В табл.4 показаны затраты для выравнивания энергетического эффекта вариантов при изменении мощности ГЭС. Для условий $y_1$ заменяемой электростанцией является ГРЭС КАТЭКа.

Элементы матрицы затрат определялись путем суммирования соответствующих данных табл.2–4. Например, для варианта $x_3$ (15 агрегатов) при сочетании условий $y_2$ имеем:

$$З_{32} = 11,91 + 9,07 + 13,83 = 34,81 \text{ млн.руб./год.}$$

Матрица затрат вместе с характерными оценками вариантов и матрицей рисков представлена в табл.5. Проанализируем сначала матрицу затрат, а затем поясним матрицу рисков и математические ожидания затрат $M_{i1}$ и $M_{i2}$ .

При анализе матрицы затрат обнаруживается, что варианты $x_5$ и $x_6$ являются недоминирующими (над ними доминирует при всех сочетаниях условий вариант $x_4$ ) и поэтому могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Варианты $x_1$ , $x_3$ и $x_4$ оптимальны при одном или двух сочетаниях условий (минимальные значения затрат в каждом столбце подчеркнуты), поэтому относятся к доминирующим. Вариант $x_2$ , не будучи локально-оптимальным, являет-

Таблица 5

Матрица затрат и характерные оценки вариантов,
млн. руб./год

| Вариант решения | Количество агрегатов | Матрица затрат | | | | | Характерные оценки | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $z_i^{max}$ | $M_{i1}$ | $M_{i2}$ | $R_i^{max}$ |
| $x_1$ | I3 | 30,3I | 35,23 | 27,48 | 50,65 | 38,66 | 50,65 | 37,25 | 32,79 | 7,08 |
| $x_2$ | I4 | 26,93 | 34,87 | 28,I8 | 48,86 | 38,78 | 48,86 | 36,I9 | 3I,44 | 3,7 |
| $x_3$ | I5 | 24,57 | 34,8I | 29,4 | 47,I8 | 39,24 | 47,I8 | 35,57 | 30,72 | I,92 |
| $x_4$ | I6 | 23,23 | 35,45 | 3I,58 | 46,39 | 40,84 | 46,39 | 35,87 | 30,96 | 4,I |
| $x_5$ | I7 | 23,33 | 37,2 | 35,23 | 46,88 | 44,04 | | | | |
| $x_6$ | I8 | 24,0 | 39,5I | 39,5I | 47,83 | 47,83 | | | | |
| | | Матрица рисков | | | | | | | | |
| $x_1$ | I3 | 7,08 | 0,42 | 0 | 4,26 | 0 | | | | |
| $x_2$ | I4 | 3,7 | 0,06 | 0,7 | 2,47 | 0,I2 | | | | |
| $x_3$ | I5 | I,34 | 0 | I,92 | 0,79 | 0,58 | | | | |
| $x_4$ | I6 | 0 | 0,64 | 4,I | 0 | 2,I8 | | | | |

ся доминирующим - над вариантом $x_1$ он доминирует при условиях $y_1$, $y_2$ и $y_4$, а над вариантами $x_3$ и $x_4$ - при условиях $y_3$ и $y_5$. Следовательно, для дальнейшего анализа должны быть оставлены первые четыре варианта. Для этих вариантов определены максимальные затраты $3_i^{max}$, матрица рисков и другие характерные оценки.

## 4. Определение математических ожиданий затрат, максимальных рисков и выработка рекомендаций

Математические ожидания затрат $M_{i1}$ и $M_{i2}$ были определены для полученных ранее рядов распределения $F_1$ и $F_2$ (табл.I).по формуле (7.I) в основном тексте.

Еще одна характерная оценка вариантов - максимальное значение риска $R_i^{max}$ - определена для бо́льшей полноты анализа, учитывая, что решение об установленной мощности ГЭС достаточно ответственное и, будучи реализовано, действует в течение всего периода эксплуатации ГЭС. Понятие "риска" довольно широко используется в теории решений*. Для какой-либо пары $x_i$ и $y_s$ риск $R_{is}$ представляет собой перерасход, который будет иметь место при сочетании условий $y_s$ в случае выбора варианта $x_i$ вместо варианта, локально-оптимального при данном сочетании $y_s$. Такие перерасходы показывают относительную разницу затрат при выборе одного варианта вместо другого.

Для определения рисков нужно на основе матрицы затрат построить аналогичную матрицу $\| R_{is} \|$. Каждое значение $R_{is}$ определяется вычитанием из соответствующих затрат $3_{is}$ минимального в данном столбце $y_s$ значения затрат (подчеркнутых в матрице затрат в табл.5). Например, для варианта решения $x_4$ и сочетания условий $y_3$ риск $R_{43}$ будет равен

$$R_{43} = 31{,}58 - 27{,}48 = 4{,}1 \text{ млн.руб./год}.$$

В каждом столбце матрицы рисков будет по крайней мере один элемент, равный нулю (для варианта, локально-оптимального при

---

* См., например: Льюс Р.Д. и Райфа Х. Игры и решения. - М.: Изд-во иностр. литер., 1961; Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. - Новосибирск: Наука, 1978.

данном сочетании условий).

Максимальное значение риска $R_i^{max}$ для какого-либо варианта $x_i$ определяется как наибольшее значение в соответствующей строке (аналогично тому, как определяются максимальные затраты $З_i^{max}$ по матрице затрат $\| З_{is} \|$):

$$R_i^{max} = \max_s R_{is} .$$

Эти максимальные риски указаны для доминирующих вариантов в правой колонке табл.5.

Анализ характерных оценок показывает, что по главным из них – математическим ожиданиям затрат $M_{i1}$ и $M_{i2}$ – наилучшим является вариант $x_3$ (установка I5 агрегатов). Этот вариант оптимален также по значениям максимального риска $R_i^{max}$. Лишь по оценке $З_i^{max}$ (являющейся вспомогательной, как и $R_i^{max}$) рационален другой вариант – $x_4$ (I6 агрегатов). В связи с этим вариант решения $x_3$ следовало бы рекомендовать для реализации.

Однако имеется достаточно важное практическое соображение, которое нужно принять во внимание, – схема электрических соединений и некоторые другие конструкционные решения оказываются более удобными при четном числе агрегатов на станции. С учетом этого рекомендуется установить на ГЭС I6 агрегатов. Другой доминирующий вариант с четным числом агрегатов (вариант $x_2$) хуже варианта $x_4$ не только по характерной оценке $З_i^{max}$, но и по главным оценкам $M_{i1}$ и $M_{i2}$. Кроме того, при бо́льшем числе агрегатов улучшаются также условия резервирования и использования мощностей ГЭС в отдаленной перспективе, когда возрастет переменная часть графиков нагрузки в ОЭЭС Сибири и смежных системах. Таким образом, установленную мощность Средне-Енисейской ГЭС рекомендуется принять 6000 МВт.

Пример 4

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМЫ ОСНОВНЫХ СЕТЕЙ ОЭЭС

### I. Постановка задачи

Рассматривается задача определения оптимальной схемы основной сети ОЭЭС напряжением 750 кВ. На территории этой ОЭЭС выделено

семь эквивалентных энергоузлов, часть из которых (рис.I,этап I) соединена действующими линиями электропередачи напряжением 330 кВ. Кроме того, рассматривается целесообразность развития межсистемной ВЛ-750 кВ с соседней ОЭЭС, представленной эквивалентным энергоузлом 8.

Развитие сети анализируется за 10-летний период, разбитый на два этапа по 5 лет. Окончательный выбор ЛЭП, подлежащих строительству, делается только для первого этапа. Этап 2 рассматривается при этом для оценки возможностей (и стоимости) адаптации первоочередных решений под условия, которые могут сложиться во второй пятилетке. Общие затраты на тот или иной вариант схемы сети определяются, естественно, для всего 10-летнего периода.

Условия развития ОЭЭС в первой пятилетке известны достаточно хорошо и при решении данной задачи принимались детерминированно. Неопределенность условий, главным образом в отношении возможных небалансов (дефицитов или избытков) мощностей в энергоузлах, важна и учитывалась только для второго этапа.

Задача носит четко выраженный динамический характер - эффективность решений, выбираемых для первого этапа, очень сильно зависит от условий и возможных вариантов развития сети на втором этапе. В связи с этим расчет матрицы затрат имеет определенные особенности - для каждого конкурирующего варианта решения на первом этапе необходимо определять различные варианты развития сети на втором этапе, соответствующие разным возможным условиям развития на этом втором этапе, рассчитывая приведенные затраты за весь период (за оба этапа).

Еще одна особенность задачи состоит в том, что состав конкурирующих вариантов решения не вытекает из самой постановки задачи, поэтому их нужно выявлять путем специальных расчетов и анализа.

## 2. Отбор представительных условий развития системы и оценка их вероятностей

Важнейшими факторами, определяющими развитие основной сети ОЭЭС, являются технико-экономические показатели сетевых объектов (подстанций и ЛЭП), а также дефициты или избытки мощности в энергоузлах, определяемые как разность между нагрузкой узлов и мощностью собственных электростанций. Анализ технико-экономических показателей с точки зрения степени их неоднозначности свидетельст-

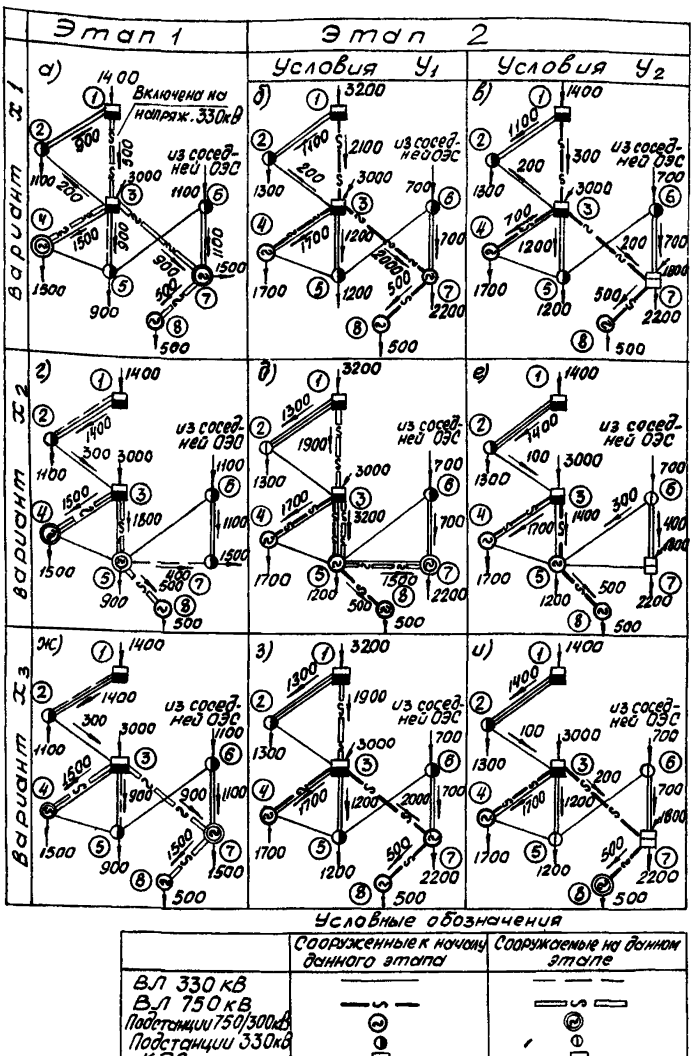



Рис.I. Варианты развития основной сети ОЭЭС на первом этапе и их адаптация к условиям второго этапа

вует о том, что при проведении оптимизационных расчетов допустимо принимать их детерминированными по некоторым средним оценкам. Это объясняется тем, что сетевые объекты будут сооружаться по типовым проектам с использованием серийного оборудования.

Дефициты (или избытки) мощности большинства энергоузлов найдены с достаточно высокой точностью, поскольку в них отсутствуют крупные потребители и электростанции, задержки ввода которых способны сильно исказить дефициты (или избытки) мощности; возможные отклонения под действием случайных причин оцениваются величиной не более $\pm$10%. Они не сопоставимы с пропускной способностью ВЛ-750 кВ, а поэтому не могут оказать влияние на выбор конфигурации основной сети ОЭЭС.

В отличие от этого энергоузлы I и 7 характеризуются существенной неоднозначностью дефицитов (или избытков) мощности, так как еще не решен вопрос о размещении в них КЭС.

В первом пятилетии ввод мощности на электростанциях задан однозначно, но возможны две альтернативы наращивания мощности КЭС во втором пятилетии (см. рис.I "а","б","в"): либо расширение КЭС в энергоузле I на 2 млн.кВт (условия $\mathcal{Y}_1$ ), либо сооружение новой КЭС той же мощности в энергоузле 7 (условия $\mathcal{Y}_2$ ). Выбор одного из этих вариантов размещения электростанций должен производиться только после разработки технико-экономических обоснований (ТЭО) электростанций. Учитывая, что подобные решения сильно влияют на выбор схемы основной сети ОЭЭС, необходимо рассматривать возможности реализации как первых, так и вторых условий. Таким образом, в данном примере отобрано только два сочетания условий, отражающих основную неопределенность ситуации.

Обоснованно оценить вероятность отобранных условий чрезвычайно трудно ввиду невозможности использовать какие-либо статистические данные (неопределенность ситуации обусловливается здесь еще не принятыми решениями). Мнения экспертов по этому вопросу резко расходятся - для каждого сочетания условий называются вероятности в диапазоне от 0,2 до 0,8. Этот широкий диапазон и будет рассматриваться при дальнейшем решении задачи.

## 3. Поиск конкурирующих вариантов решения

Ввиду неочевидности возможных вариантов решения был применен рекомендованный в разделе 5 "Методических рекомендаций" прием определения локально-оптимальных вариантов. Для каждого из отобран-

ных выше сочетаний условий с помощью оптимизационной модели были найдены соответствующие оптимальные варианты развития основной сети ОЭЭС: для условий $y_1$ - вариант $x_1$, показанный на рис.I "а", "б", а для условий $y_2$ - вариант $x_2$, отмеченный на рис.I "г" и "е".

Вариант $x_1$, соответствующий расширению КЭС в энергоузле I, требует такого увеличения потоков мощности из энергоузла I в центральную часть ОЭЭС, что на втором этапе становится эффективной электропередача 750 кВ из энергоузла I в узел 3. Учитывая это, уже на этапе I оказывается целесообразным соорудить ВЛ-750 кВ с временной ее эксплуатацией на напряжении 330 кВ. Дефицит мощности энергоузлов 6 и 7, составляющий 400 МВт на первом этапе и 1500 МВт на втором этапе, наиболее экономично покрывать за счет перетока мощности из центральной части ОЭЭС по ВЛ-750 кВ, связывающей энергоузлы 3 и 7. Эту передачу целесообразно сооружать уже на первом этапе и использовать одновременно как часть межсистемной связи 750 кВ, соединяющей данную ОЭЭС с узлом 8, принадлежащим соседней ОЭЭС. Питание узла 5 по условиям как первого, так и второго этапов достаточно усилить с помощью дополнительной цепи 330 кВ, а энергоузла 4 - цепи ВЛ-750 кВ.

Вариант $x_2$, соответствующий вводу новой КЭС в энергоузле 7, требует существенно меньшего развития новых линий: для выдачи мощности энергоузла I достаточно построить лишь дополнительную ВЛ-330 кВ до энергоузла 2; для покрытия дефицита энергоузла 7 на первом этапе нецелесообразно сооружать новую ВЛ-750 кВ из центральной части ОЭЭС (от энергоузла 3), а достаточно построить одну цепь ВЛ-330 кВ из энергоузла 5; связь с соседней ОЭЭС при этом наиболее эффективно осуществлять с помощью ВЛ-750 кВ по кратчайшей трассе от энергоузла 3 через энергоузел 5.

Поскольку схема сети выбирается лишь для первого пятилетия, то оба локально-оптимальных варианта анализируются с точки зрения их реализации на первом этапе. Их сопоставление показывает (см. рис. I "а" и "г"), что варианты достаточно сильно различаются, а поэтому необходимо исследовать возможности адаптации каждого варианта к изменению условий на втором этапе. Вариант $x_1$, наилучшим образом приспособленный к расширению КЭС в энергоузле I (условия $y_1$), в случае строительства новой КЭС в энергоузле 7 на втором этапе не требует дополнительного усиления сети, сооруженной на первом этапе. Этот вариант адаптируется к условиям второго

этапа путем изменения потоков мощности между энергоузлами (рис.I "в" ): так, построенные на первом этапе ВЛ-750 кВ между энергоузлами I-3 и 3-7 при этом используются слабо, но зато сильно нагружены ВЛ-330 кВ между энергоузлами I-2 и 3-5.

В отличие от этого вариант $x_2$, соответствующий сооружению КЭС в энергоузле 7 (условия $y_2$), при расширении КЭС в энергоузле I (условия $y_1$) требует существенного усиления сети на втором этапе за счет дополнительного сооружения ВЛ-750 кВ между энергоузлами I-3, 3-5 и 5-7 (рис. I"д"). Необходимость сооружения ВЛ-750 кВ для питания энергоузла 7 по трассе 3-5-7 вместо более короткой линии 3-7 обусловлена дополнительно заданным исходным условием, согласно которому сооружение линии 3-7 возможно лишь на первом этапе, так как на втором этапе соответствующая трасса будет занята.

Выявленные трудности адаптации локально-оптимальных вариантов сети на первом этапе к изменяющимся условиям второго этапа определяют целесообразность рассмотрения третьего, дополнительного варианта первоочередной схемы сети. Этот вариант $x_3$ не является оптимальным ни при одном из рассматриваемых условий, однако он обладает лучшей способностью к адаптации. Он получен как некоторая комбинация вариантов $x_1$ и $x_2$ : так, выдача мощности из энергоузла I осуществляется в соответствии с вариантом $x_2$, а питание энергоузлов 5 и 7 и межсистемная связь с энергоузлом 8 - в соответствии с вариантом $x_1$ (рис. I "ж"). Анализ этого варианта при двух условиях развития на втором этапе (рис. I "з" и "и") свидетельствует о том, что при реализации условий $y_1$ (расширении КЭС в энергоузле I) на втором этапе потребуется построить только ВЛ-750 кВ между энергоузлами I-3, а при реализации условий $y_2$ (сооружении КЭС в энергоузле 7) дополнительного развития сети на втором этапе вообще не потребуется.

## 4. Расчет и анализ матрицы затрат

Рассмотренные три варианта развития сети на первом этапе (рис.I "а", "г" и "ж") с соответствующими их модификациями на втором этапе были оценены экономически. Сначала был выполнен расчет капитальных затрат и ежегодных издержек по отдельным этапам развития. Результаты этих расчетов приводятся в табл. I.

Приведенные затраты по вариантам схем за весь период рассчи-

Таблица I

Экономические показатели вариантов развития основной сети ОЭЭС, млн.руб.

| Вариант решения | Этап I | | Этап 2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Условия $y_1$ | | Условия $y_2$ | |
| | $K_i^I$ | $U_i^I$ | $K_{i1}^{II}$ | $U_{i1}^{II}$ | $K_{i2}^{II}$ | $U_{i2}^{II}$ |
| $x_1$ | 80,3 | 6,9 | 3,6 | 13,I | 4,75 | 7,I |
| $x_2$ | 6I,25 | 7,2 | I00,9 | II,85 | - | 2,5 |
| $x_3$ | 63,0 | 7,35 | 3I,8 | I2,4 | 4,75 | 6,75 |

тывались по выражению (I), предусматривающему приведение затрат второго этапа к уровню первого этапа.

$$З_{is} = (E_н K_i^I + U_i^I) + \left[E_н K_{is}^{II} + (U_{is}^{II} - U_i^I)\right](1+E_{нп})^{T-1}, \quad (I)$$

где $E_н$ - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, принимаемый равным 0,I2; $E_{нп}$ - коэффициент дисконтирования, равный 0,08; $T$ - интервал между этапами (равный пяти годам); $S$ - номер условий развития на втором этапе.

Рассчитанные по выражению (I) приведенные затраты на развитие сети для трех сравниваемых вариантов первоочередной схемы и двух возможных условий развития ОЭЭС сведены в матрицу (табл. 2).

Таблица 2

Матрица затрат, млн.руб./год

| $x_i$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $З_i^{max}$ |
|---|---|---|---|
| $x_1$ | 2I,2 | I7,0 | 2I,2 |
| $x_2$ | 26,0 | II,4 | 26,0 |
| $x_3$ | 2I,5 | I5,I | 2I,5 |

В данном примере платежная матрица получилась небольшого размера, что делает ее анализ более наглядным.

Проверка вариантов на доминируемость показывает, что все три

варианта являются таковыми. Вариант $x_3$, не будучи локально-оптимальным, доминирует над вариантом $x_1$ при условиях $y_2$, а над вариантом $x_2$ при условиях $y_1$. Поэтому все варианты оставлены для дальнейшего анализа и для них определена характерная оценка $3_i^{max}$.

## 5. Анализ математических ожиданий затрат и выработка рекомендаций

Учитывая отсутствие достаточно определенных оценок вероятностей рассматриваемых условий, математические ожидания затрат целесообразно сопоставить для полного диапазона изменения вероятностей условий от 0 до I. Это нетрудно сделать, так как рассматривается только два сочетания условий.

Обозначим через $\rho_1$ вероятность принятия решения о расширении КЭС в узле I (вероятность принятия противоположного решения, естественно, будет равна $\rho_2 = I - \rho_1$). На рис. 2 приведены зависимости математических ожиданий затрат для всех трех вариантов решения от вероятности $\rho_1$. Можно видеть, что каждый конкурирующий вариант решения оптимален в некоторой области значений $\rho_1$: вариант $x_1$ оптимален при $0{,}85 < \rho_1 \leq I{,}0$; вариант $x_2$ оптимален при $0{,}0 \leq \rho_1 \leq 0{,}45$; вариант $x_3$ оптимален при $0{,}45 < \rho_1 \leq 0{,}85$.

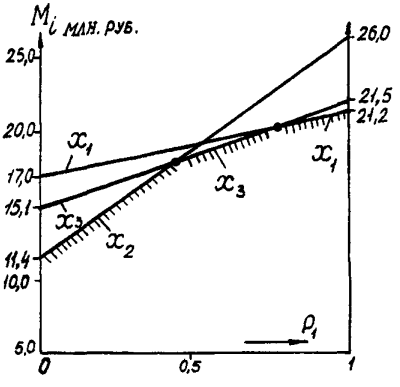



Рис.2. Зависимости математических ожиданий затрат для разных вариантов решения от вероятности реализации условий $y_1$.

Сопоставляя эти результаты с указанной выше экспертной оценкой вероятностей ($\rho_1 = 0{,}2 \div 0{,}8$), можно исключить из рассмотрения вариант $x_1$ (который оптимален лишь при $\rho_1 > 0{,}85$), но неопределенность выбора между вариантами $x_2$ и $x_3$ остается.

Для снятия этой неопределенности наиболее целесообразным было бы ускорить разработку ТЭО электростанций и принять окончательное решение о строительстве одной из них. В случае же, если это окажется невозможным по имеющимся срокам, то следует рекомендовать для реализации вариант $x_3$, как более гибкий, обеспечивающий в неблагоприятных условиях значительно меньшие затраты ($З_3^{max}$ = 21,5 млн.руб/год), чем вариант $x_2$ ($З_2^{max}$ = 26,0).

Пример 5

## ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

### I. Постановка задачи

Экономическая эффективность сооружения и эксплуатации АЭС в значительной мере определяется ее надежностью. Уровень надежности энергоблока зависит не только от надежности основного и вспомогательного оборудования, но и от технологической схемы соединения оборудования, его единичной мощности и наличия резервов разного назначения (структурного, нагрузочного, функционального и т.п.).

Отказы основного и вспомогательного оборудования могут приводить к полным или частичным отказам энергоблока. При полных отказах энергоблок останавливается и производится восстановление отказавшего оборудования. За время восстановления нагрузку отказавшего энергоблока обеспечивает аварийный резерв электроэнергетической системы. При частичных отказах энергоблок остается в работе с пониженной мощностью. Величина понижения рабочей мощности зависит от типа отказавшего оборудования и его роли в общей технологической схеме энергоблока. Так, при наличии двух турбоустановок в энергоблоке имеется возможность работы с одной турбоустановкой, если отказала вторая. Частичный недоотпуск электроэнергии также компенсируется аварийным резервом в ЭЭС. Таким образом, влияние отказов оборудования на эффективность энергоблока проявляется на уровне АЭС и на уровне ЭЭС.

На уровне АЭС отказы оборудования приводят к дополнительным затратам на восстановление отказавшего оборудования, дополнительному расходу топлива при вынужденных остановах и пусках или из-

за снижения КПД блока при частичных отказах.

На уровне ЭЭС полные и частичные отказы энергоблока приводят к необходимости создания аварийного резерва. Это требует дополнительных капиталовложений и эксплуатационных издержек в ЭЭС.

Следовательно, при оценке затрат по АЭС с учетом надежности оборудования необходимо учитывать затраты как по данному энергоблоку ( $З_э$ ), так и по ЭЭС ( $З_с$ ):

$$З = З_э + З_с \ . \qquad (I)$$

Предварительный анализ технологических схем первого и второго контуров АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) выявил четыре основных конкурирующих варианта для энергоблока мощностью 1000 МВт. Эти варианты отличаются числом парогенераторов (ПГ) в первом контуре (четыре или два) и числом турбоустановок (ТУ) во втором контуре (две или одна). Данные варианты схемы энергоблока различаются не только капиталовложениями и уровнем надежности оборудования, но и соотношением полных и частичных отказов. Следовательно, в рассматриваемой задаче имеется четыре варианта решения: $x_1$ - вариант схемы с четырьмя ПГ и двумя ТУ (4+2); $x_2$ - с четырьмя ПГ и одной ТУ (4+1); $x_3$ - с двумя ПГ и двумя ТУ (2+2); $x_4$ - с двумя ПГ и одной ТУ (2+1). Вектор $x$ принимает в данном случае дискретные значения.

## 2. Отбор представительных сочетаний исходной информации и оценка их вероятностей

Сложность определения оптимальной технологической схемы энергоблока АЭС на этапе проектирования вызвана неоднозначностью стоимостных показателей основного и вспомогательного оборудования, а также неопределенностью показателей надежности этого оборудования. Существующие методы оценки показателей надежности оборудования на стадии эскизно-технического проектирования не позволяют получать точные или вероятностные показатели надежности для конкретного оборудования. Предварительные расчетные исследования влияния надежности оборудования и резервирования в ЭЭС на выбор схемы АЭС с ВВЭР показали, что наибольшую неопределенность вносят соотношения капиталовложений и надежности сравниваемых вариантов схемы. Поэтому при выполнении расчетных технико-экономических исследований был принят достаточно широкий диапазон значений

показателей оборудования. При этом экспертно учитывалось соотношение показателей надежности и единичной мощности однотипного оборудования. Были сформированы три варианта показателей надежности оборудования (параметра потока отказов и времени восстановления). Эти варианты отвечают "оптимистической", "средней" и "пессимистической" оценкам показателей надежности. Аналогично определены три оценки стоимостных характеристик оборудования.

Принято, что при оптимистической оценке удвоение единичной мощности ПГ (с 250 МВт до 500 МВт) дает экономию удельных капиталовложений до 12 руб./кВт, при средней оценке - 6 руб./кВт и при пессимистической оценке - 0 руб./кВт. Соответственно при удвоении мощности турбоустановки (с 500 МВт до 1000 МВт) экономия удельных капиталовложений оценена в 20, 10 и 2 руб./кВт.

В результате анализа исходной информации по стоимости и надежности оборудования для каждого варианта структуры АЭС сформировано девять сочетаний существенных показателей (табл.1).

Таблица 1

Сочетания оценок информации по стоимости и надежности оборудования

| Стоимость \ Надежность | Оптимистическая | Средняя | Пессимистическая |
|---|---|---|---|
| Оптимистическая | $y_1$ | $y_4$ | $y_7$ |
| Средняя | $y_2$ | $y_5$ | $y_8$ |
| Пессимистическая | $y_3$ | $y_6$ | $y_9$ |

Для получения рядов распределения вероятностей $F_Q$ для отобранных сочетаний информации были привлечены три эксперта (A,B,C). Их оценки вероятностей различных сочетаний информации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Экспертные ряды распределения вероятностей отобранных сочетаний информации

| $F_Q$ \ $y_s$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ | $y_9$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $F_A$ | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,34 | 0,10 | 0,07 | 0,10 | 0,06 |
| $F_B$ | 0,04 | 0,11 | 0,08 | 0,09 | 0,13 | 0,09 | 0,10 | 0,20 | 0,16 |
| $F_C$ | 0,12 | 0,10 | 0,08 | 0,04 | 0,15 | 0,09 | 0,16 | 0,16 | 0,10 |

Как видно из табл.2, экспертом А в основу положено примерно симметричное распределение вероятностей надежности и стоимости, причем средние оценки по надежности ( $y_2, y_5, y_8$ ) имеют бо́льшую вероятность, чем "оптимистические" и "пессимистические". У эксперта В бо́льшую вероятность имеют средние и "пессимистические" оценки ( $y_2, y_5, y_8, y_9$ ), а у эксперта С - сочетания средних и "оптимистических" оценок информации ( $y_1, y_2, y_5, y_7, y_8$ ). Практически у всех трех экспертов сочетание средних оценок ( $y_5$ ) получило бо́льшую вероятность по сравнению с другими сочетаниями.

### 3. Расчет и анализ матрицы затрат

В качестве оценочной функции приняты приведенные затраты на создание энергоблока и использование его в ЭЭС:

$$З(x,y)=З_э(x,y)+З_с(x,y) \qquad (2)$$

при наличии внутренних со стороны АЭС и внешних со стороны ЭЭС ограничений.

Внутренние ограничения отражают необходимость поддержания допустимых значений термодинамических, расходных и режимных параметров АЭС при нормальной эксплуатации, полных и частичных отказах. Внешние ограничения определяются условиями эксплуатации и требуемым уровнем надежности энергообеспечения потребителей в ЭЭС.

В данной задаче отсутствует необходимость в дополнительных корректирующих мероприятиях, так как выбранный вариант технологической схемы в период эксплуатации не изменяется, а различия в надежности и соответствующем недоотпуске электроэнергии компенсируются аварийным резервом ЭЭС.

Для проведения расчетных исследований использовалась математическая модель энергоблока АЭС, которая позволяет при заданных сочетаниях исходной информации $y_s$ определять показатели надежности и приведенные затраты для варианта $x_i$ с учетом системных связей. Модель позволяет варьировать исходную информацию как по энергоблоку, так и по технико-экономическим показателям резервных энергоустановок в ЭЭС.

В результате расчетов на данной модели получена матрица значений приведенных затрат для четырех конкурирующих вариантов схемы при девяти сочетаниях информации по надежности и стоимости (табл.3).

Таблица 3

Приведенные затраты по вариантам схемы энергоблока
АЭС с ВВЭР-1000 с учетом надежности, млн.руб./год

| Вариант схемы | Сочетания исходной информации | | | | | | | | | $З_i^{max}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $У_1$ | $У_2$ | $У_3$ | $У_4$ | $У_5$ | $У_6$ | $У_7$ | $У_8$ | $У_9$ | |
| (4+2) | 116,3 | 127,3 | 137,4 | 139,2 | 150,2 | 160,3 | 162,4 | 167,7 | 182,8 | 182,8 |
| (4+1) | 113,4 | 131,7 | 146,9 | 134,8 | 151,2 | 170,5 | 154,9 | 171,3 | 188,4 | 188,4 |
| (2+2) | 114,4 | 134,8 | 151,3 | 136,0 | 147,5 | 157,4 | 145,2 | 164,3 | 189,8 | 189,8 |
| (2+1) | 114,6 | 139,2 | 158,3 | 131,7 | 148,5 | 157,9 | 146,2 | 163,8 | 192,9 | 192,9 |

Можно видеть, что при оптимистической оценке показателей надежности и стоимости оборудования (сочетание информации $y_1$) локально-оптимальной является схема с четырьмя парогенераторами и одной турбоустановкой (4+I). Вариант (4+2) наиболее эффективен при сочетаниях информации $y_2$, $y_3$ и $y_9$. При средней оценке надежности и средней и пессимистической оценках стоимости ($y_5$, $y_6$), а также при сочетании $y_7$ локально-оптимальным является вариант (2+2). В двух случаях из девяти ($y_4$, $y_8$) экономически эффективен вариант (2+I). Следовательно, каждый вариант технологической схемы энергоблока АЭС с ВВЭР-I000 становится хотя бы один раз локально-оптимальным. Поэтому все четыре варианта являются доминирующими и оставлены для дальнейшего анализа.

## 4. Определение математических ожиданий затрат и выработка рекомендаций

На основе матрицы затрат (табл.3) были определены математические ожидания затрат для трех экспертных рядов распределения (табл.2). Полученная матрица математических ожиданий приведена в табл.4.

Таблица 4

Матрица математических ожиданий затрат, млн.руб./год

| $x_i$ \ $F_q$ | | $F_A$ | $F_B$ | $F_C$ |
|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | (4+2) | I49,4 | I55,2 | I52,6 |
| $x_2$ | (4+I) | I5I,5 | I57,8 | I54,5 |
| $x_3$ | (2+2) | I48,4 | I54,8 | I5I,2 |
| $x_4$ | (2+I) | I49,5 | I56,2 | I52,8 |

При всех экспертных рядах распределения оптимальным оказался вариант схемы $x_3$ (2+2) с двумя парогенераторами в первом контуре и двумя турбинами во втором контуре. Этот вариант можно достаточно уверенно рекомендовать для реализации.

Нужно заметить, что без учета влияния надежности оптимальным по величине приведенных затрат является вариант $x_4$ (2+I). Следовательно, учет фактора надежности может изменить решение по схеме энергоблока.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рецактор Г.Г.Боннер

Подписано к печати 28.04.88
Формат 60 х 84 х I/I6
Уч.-изд.л.4,I Тираж 800 экз.
НЕ 02942
Заказ № ОК-73 Цена 40 коп.
Иркутская областная типография № I
Управление издательств,полиграфии и книжной торговли
г.Иркутск,ул.К,Маркса - II

gost.e-ecolog.ru