

созданы атомно-химические котельные, которые позволяют существенно расширить эффективное применение ядерных энергоресурсов для централизованного теплоснабжения за счет охвата более мелких потребителей тепла, доля которых в общем объеме теплотребления составляет до 40%.

Поступила в Редакцию 5.VI.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелентьев Л. А. «Теплоэнергетика», 1976, N 11, с. 6.

2. Батуров Б. Б. и др. Докл. на Междунар. конф. МАГАТЭ по ядерной энергетике и ее топливному циклу. Зальцбург, 2—13 мая 1977 г. IAEA-CN-36/338.
3. Левенталь Г. Б. и др. «Теплоэнергетика», 1974, N 11, с. 14.
4. Мелентьев Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетике. М., «Высшая школа», 1976.
5. Сазанов Б. В., Корнеев А. И., Иванов Г. В., Соболев И. Д. В кн.: Труды института ВНИПИЭнергопром. М., 1975, вып. 7, с. 27.
6. Kugeler K., Kugeler M., Nieben H., Harth R. In: Proc. IAEA Symp. «The development of Helium-Heated Steam Reformers». Vienna, IAEA, 1975, p. 341.

УДК 621.039.003

Многокритериальная оптимизация развития ядерной энергетики в рамках СЭВ на перспективу

БОБОЛОВИЧ В. Н., ТРЕХОВА Н. А.

Ядерная энергетика стран — членов СЭВ представляет собой сложную систему. Национальные программы развития ядерной энергетики, с одной стороны, могут служить основой для составления прогноза развития ядерной энергетики стран — членов СЭВ как региональной системы, а с другой — составляться с учетом требований, предъявляемых к системе ядерной энергетики СЭВ. Такой системный подход к народнохозяйственным задачам позволяет выявить эффект социалистического сотрудничества в области ядерной энергетики — эффект интеграции.

При прогнозировании системы ядерной энергетики стран — членов СЭВ ввиду наличия множества факторов, влияющих на ее развитие, возникают трудности, связанные с динамикой и многоэтапностью процессов, многоуровневой и иерархической структурой, с неопределенностью условий и параметров, с проблемой выбора критерия оптимизации.

Проблема выбора такого критерия (функции цели) при решении оптимизационных задач исследования структуры ядерной энергетики на перспективу приводит к так называемой многокритериальной оптимизации, переход к которой обусловлен также стремлением оценить качество принимаемых решений с различных точек зрения. Применяя методы решения многокритериальных задач, можно проводить оптимизацию структуры развивающейся ядерной энергетики одновременно по нескольким критериям.

Многокритериальные задачи возникают в следующих ситуациях [1] (см. рисунок);

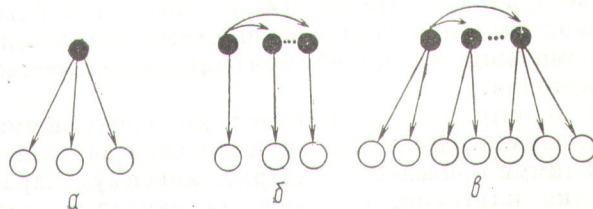
а) объект рассматривается как один элемент с несколькими критериями;

б) объект состоит из нескольких элементов, имеющих по одному критерию оптимальности. В этом случае многокритериальность возникает не у элемента, а у системы в целом, потому что в системе взаимосвязаны и действуют много таких однокритериальных элементов;

в) объект может содержать много элементов, каждый из которых находится в многокритериальной ситуации.

Это различие ситуаций (один многокритериальный элемент, много однокритериальных элементов и много многокритериальных элементов) принципиально, потому что методы решения, применяемые в одном случае, оказываются непригодными в другом.

До сих пор оптимизация развития ядерной энергетики в рамках СЭВ проводилась только по одному минимизируемому критерию — интегральной потребности в природном уране. Это было вызвано, во-первых, важностью такого критерия для только что начинающей развиваться этой новой важной отрасли энергетики;



Ситуации, приводящие к многокритериальным задачам:
● — элемент; ○ — критерий

во-вторых, не было еще теоретических основ экономики ядерной энергетики (первая работа в этом направлении [2] была опубликована в 1969 г.); в-третьих, отсутствием в то время единой для стран — членов СЭВ валюты, какой является переводной рубль.

Для более полного изучения влияния различных факторов на наши представления о возможных перспективах развития ядерной энергетики при ее математическом моделировании можно использовать также и экономический критерий, например приведенные затраты.

Применение методов решения многокритериальных задач в ядерной энергетике позволяет как совмещать эти важнейшие критерии оптимизации (интегральную потребность в природном уране и приведенные затраты), так и дополнительно учитывать другие критерии (трудозатраты, металлозатраты и т. п.).

При решении многокритериальных задач ищется такое решение, которое было бы оптимальным для множества функций цели $f = \{f_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$). Однако в большинстве случаев такое решение не существует одновременно для всех f_i . Поэтому под решением многокритериальной задачи понимается такое решение, которое может не являться оптимальным ни для одной функции цели, но оказывается наиболее приемлемым для всей совокупности функций цели. Такое решение многокритериальной задачи называется компромиссным.

Рассмотрим те задачи исследования структуры ядерной энергетики, для которых важно применение методов многокритериальной оптимизации.

Задача 1. Оптимизация структуры ядерной энергетики стран — членов СЭВ как единой системы по двум критериям — по минимуму расхода природного урана и по минимуму приведенных затрат в переводных рублях. Это соответствует ситуации «один многокритериальный элемент». Ограничения накладываются на вводы генерирующих мощностей, на выработку электроэнергии и баланс плутония.

Задача 2. При оптимизации структуры ядерной энергетики на перспективу необходимо иметь в виду, что к 1990 г., после которого ожидается массовый ввод быстрых реакторов-размножителей, потребуется большое количество плутония.

Поэтому задача решается со следующими целевыми функциями: минимум расхода урана, минимум приведенных затрат, максимум наработки плутония. Ограничения накладываются на вводы генерирующих мощностей и на вы-

работку электроэнергии. Ситуация — «один многокритериальный элемент».

Решение такой задачи для прогнозирования на 40—50 лет позволит полнее выявить роль реакторов-размножителей и необходимость их развития в структуре ядерной энергетики в рамках СЭВ.

Задача 3. При исследовании ядерной энергетики на перспективу ввиду больших масштабов ядерной энергетики, строительства большого числа промышленных АЭС и освоения новых типов АЭС, необходимости сотрудничества стран — членов СЭВ при строительстве отдельных АЭС возникают проблемы, связанные с машиностроительной базой, металлозатратами и трудозатратами. Поэтому целесообразна оптимизация структуры ядерной энергетики по следующим критериям: минимум приведенных затрат, минимум металлозатрат, минимум трудозатрат. В этом случае возникает самая сложная ситуация — «много многокритериальных элементов».

Задача 4. При решении первых двух задач оптимизируется структура ядерной энергетики стран — членов СЭВ в целом. Чтобы исследовать структуру и перспективы развития ядерной энергетики отдельно для каждой страны, целесообразно проводить оптимизацию структуры ядерной энергетики (рассматривая ядерную энергетику стран — членов СЭВ как единую систему) сначала по минимуму затрат в каждой стране, а на следующем этапе — по минимуму общих затрат в системе. Это соответствует ситуации «много однокритериальных элементов». На элементы накладываются ограничения по вводу мощностей в каждой стране. Связь между элементами обеспечивается уравнениями баланса плутония. Решение такой задачи представляет большой интерес для исследования стратегий развития ядерной энергетики в рамках СЭВ.

Практическим инструментом решения многокритериальных задач являются методы ведущей целевой функции, обобщенной функции цели, метод последовательных уступок. Существуют и другие методы, применяемые при решении многокритериальных задач. Однако они менее соответствуют задачам, стоящим при оптимизации развития ядерной энергетики.

Метод ведущей целевой функции [3] рассматривает, как это видно уже из названия, оптимизацию задачи по одной целевой функции. Остальные целевые функции рассматриваются как дополнительные ограничения при отдельных шагах вычислений, выполняемых по сим-

плекс-методу. Таким образом, многокритериальная задача сводится к традиционной однокритериальной. Этот метод применим для многокритериальных задач с линейными функциями цели и линейными ограничениями. Его можно использовать при решении задачи 3.

Разновидность метода ведущей целевой функции представляет собой метод Радзиковского [3], в котором на первом шаге предусматривается оптимизация по каждому критерию. Рассмотрим, например, трехкритериальную задачу. Пусть оптимальные значения критериев f_1^0, f_2^0, f_3^0 (для определенности примем их максимальными при оптимизации по каждому из них отдельно). Выделяется наиболее важный критерий, например f_3 . Полученные оптимальные значения остальных критериев сравниваются с заданными величинами D_1, D_2 . На следующем шаге проводится оптимизация по наиболее важному критерию f_3 при дополнительных ограничениях:

$$D_1 \leq f_1 \leq f_1^0; \quad D_2 \leq f_2 \leq f_2^0.$$

Недостатком этого метода является то, что из-за введения дополнительных ограничений данная задача может не иметь допустимых решений.

Метод обобщенной функции цели. Такую функцию можно формировать разными способами. Выбрав весовые коэффициенты (α_i) для неравнозначных функций цели (число которых M), можно ввести обобщенную функцию цели:

$$F(x) = \sum_{i=1}^M \alpha_i f_i(x).$$

Если критерии равноценные, то в качестве обобщенной функции цели может выступать суммарная относительная потеря [4], равная сумме относительных отклонений критериев оптимальности множества от своих оптимальных значений:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0} + \sum_{i=m+1}^M \frac{f_i(x) - f_i^0}{f_i^0},$$

где f_i^0 — оптимальное значение i -го критерия. Первая сумма записана для максимизируемых критериев, вторая — для минимизируемых. Такой обобщенный критерий удобно использовать для критериев с разной размерностью, например для задач 1 и 3.

В том случае, когда критерии не равнозначны, обобщенная целевая функция видоизменяется. В таком случае пусть задано предпочтение целевых функций по важности $f_1 > f_2 > \dots > f_M$ ($>$ — знак предпочтения). Причем

это предпочтение задано в количественной шкале по сравнению с наименее важным критерием величинами $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{M-1}$. Величины ρ_i свидетельствуют о том, во сколько раз оптимальное решение задачи по i -му критерию предпочтительнее решения по M -му критерию. Тогда обобщенный критерий примет вид

$$F(x) = \sum_{i=1}^m \frac{\rho_i}{f_i^0} [f_i^0 - f_i(x)] + \sum_{i=m+1}^{M-1} \frac{\rho_i}{f_i^0} [f_i(x) - f_i^0] + \frac{f_M(x) - f_M^0}{f_M^0}.$$

Метод последовательных уступок [5] также применим в случае неравнозначности критериев. Пусть все критерии уже расположены в порядке убывания их важности: $f_1 > f_2 > \dots > f_M$. Для простоты будем считать, что все они должны иметь максимальное значение. Алгоритм нахождения компромиссного решения следующий. Сначала находится оптимальное решение по одному критерию f_1 . Затем назначается некоторая «уступка» Δf_1 , определяющая потерю, которую можно уступить по этому критерию, чтобы получить лучший результат по следующему по важности критерию f_2 . Теперь находим оптимальное решение по критерию f_2 при дополнительном ограничении

$$f_1(x) \geq f_1^0 - \Delta f_1,$$

где f_1^0 — оптимальное значение критерия f_1 .

Далее снова назначается уступка Δf_2 , определяющая потерю от оптимального значения второго критерия, полученного при решении этой задачи, чтобы затем получить оптимальное решение критерия f_3 , и т. д.

Метод решения многокритериальных задач можно использовать для произвольной функции цели при произвольных ограничениях. Но в ряде случаев этот метод непосредственно не применим, так как возникают трудности, связанные с решением оптимизационных задач, в которых учитываются дополнительные ограничения. Следует заметить, что, используя указанные методы, необходимо задавать «веса» целевых функций или предпочтения их по важности. Для этого целесообразно применять методы экспертных оценок [6], что особенно важно в такой молодой отрасли, как ядерная энергетика, так как они позволяют привлечь практический опыт, знания, интуицию специалистов для формирования корректных моделей поведения системы.

Наиболее распространенные методы обработки экспертных оценок — метод предпочтения и метод ранга.

В методе предпочтения эксперты распределяют заданные критерии по мере убывания их важности, определяя место каждого критерия.

Пусть R_{ij} — место i -го критерия, определенного j -м экспертом. Тогда весовые коэффициенты критериев определяются выражением

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij},$$

где m — число критериев; n — число экспертов.

В методе рангов эксперт оценивает важность критерия по количественной шкале от 0 до 10. Весовые коэффициенты критериев в этом случае определяются выражением

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^n W_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij},$$

где $W_{ij} = \gamma_{ij} / \sum_{i=1}^m \gamma_{ij}$ (γ_{ij} — ранг i -го критерия у j -го эксперта).

Рассмотрим вариант системы ядерной энергетики стран — членов СЭВ: Болгарии, Венгрии, ГДР, Польши, Румынии, СССР, Чехословакии. Будем решать оптимизационную задачу с общим складом нарабатываемого плутония и с экономическими критериями. Остановимся подробнее на решении этой задачи методом суммарных относительных потерь. Выбор метода обусловлен линейностью функций цели и ограничений, сравнительной простотой вычислений, возможностью использования функций цели разных размерностей. Обобщенная функция цели и функции цели каждой из стран — членов СЭВ могут быть представлены или в национальной валюте, или в переводных рублях.

Для этой задачи вводятся следующие ограничения [7]: балансовое уравнение вводимой мощности для каждой страны

$$\sum_{f=1}^n x_{f, \tau, i} = N_{\tau, i},$$

где $i = 1, 2, \dots, M$ (M — число стран — членов СЭВ); $x_{f, \tau, i}$ — величина вводимой во временном интервале τ мощности АЭС типа f в i -й стране; $N_{\tau, i}$ — необходимый прирост в интервале τ мощности всех АЭС в i -й стране.

Структурная связь между вводимыми в разных странах мощностями АЭС в рассматриваемом варианте выражается уравнением баланса вторичного ядерного топлива — плутония (в

данной задаче рассматривается уран-плутониевый цикл) между потреблением его реакторами-размножителями и наработкой всеми АЭС. Это условие может быть сформулировано следующим образом: в каждый момент времени запас плутония в системе, готового для загрузки в реакторы-размножители, должен быть неотрицательным.

Введем следующие обозначения: F_a — множество типов АЭС, в которых используется в качестве топлива уран; F_b — множество типов АЭС на плутонии; $g_{f_b, \tau}^0$ — удельный расход плутония на первичную загрузку АЭС (на единицу установленной мощности) с реакторами f_b типа ($f_b \in F_b$), введенными в интервале τ ; $g_{f, \tau}$ — удельная наработка плутония на единицу вырабатываемой в интервале τ электроэнергии; $g_{f_b, \tau}$ — удельный расход плутония на перегрузку на единицу вырабатываемой в интервале τ электроэнергии; r_b — инерция внешнего топливного цикла, т. е. время от выгрузки твэлов до загрузки их после переработки в реакторы; α_f — запас готового к загрузке плутония, имеющегося в системе к концу интервала τ ; $h_{f, j, \tau}$ — годовое число часов использования мощности АЭС типа f в j -м режиме в интервале τ ; $G_{\tau-r_b}$ — плутоний, наработанный в интервале $\tau - r_b$ существующими к началу расчетного периода АЭС.

Рассматриваются два режима работы АЭС: с минимально возможным числом часов использования в первый год ввода мощности ($j = 1$) и с минимально возможным числом часов использования ($j = 2$) в последующие годы работы АЭС. В первый год работы АЭС с реакторами-размножителями расход топлива на перегрузку равен нулю. Количество плутония, нарабатываемого всеми типами АЭС в интервале τ , определяется соотношением

$$P_{\tau} = G_{\tau-r_b} + \sum_{f=1}^n \sum_{j=1}^{\alpha} \sum_{\tau=1}^{r-r_b} \sum_{i=1}^M g_{f, \tau} h_{f, j, \tau} x_{f, \tau, i}.$$

Количество плутония, загружаемого в АЭС f -го типа, вводимые в интервале τ , равно

$$P_r^0 = \sum_{f_b \in F_b} \sum_{i=1}^M g_{f_b, \tau}^0 x_{f_b, \tau, i}.$$

Расход плутония на перегрузку в интервале τ определяется из соотношения

$$\bar{P}_{\tau} = \sum_{f_b \in F_b} \sum_{j=1}^2 \sum_{\tau=1}^{r-1} \sum_{i=1}^M g_{f_b, \tau} h_{f_b, j, \tau} x_{f_b, \tau, i}.$$

Получаем условие неотрицательности запаса товарного плутония в системе в виде

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Функция цели в этом случае

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

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

Поступила в Редакцию 24.IV.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

УДК 621.311.2:621.039+001.57+519.283

Учет фактора неопределенности

при прогнозировании развития ядерной энергетики

ЧЕРНАВСКИЙ С. Я.

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

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

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

и линейного функционала, минимизируемого на области (1),

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

где c — вектор удельных затрат.