Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. И. Арончик, В. П. Балтер, Б. З. Чертков, Математическое моделирование и оптимизация технико-экономических показателей региональной энергосистемы в условиях нечеткости исходной информации, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2002, выпуск 16, 149–154

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu113>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.207.124.84

26 апреля 2023 г., 16:40:52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.311

Г.И. Арончик, В.П. Балтер, Б.З. Чертков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрены основные особенности математического моделирования и оптимизации плановых технико-экономических показателей региональной энергосистемы на этапе планирования деятельности в условиях нечеткости исходной информации. Для формализации алгоритмов вариантных расчетов использован аппарат интервальной математики. Описаны алгоритмы формирования оценок составляющих затрат и оптимизации распределения нагрузки в энергосистеме. Приведен пример численной реализации предложенного подхода.

Одним из основных элементов планирования производственной деятельности региональной энергосистемы является прогнозирование и минимизация затрат на производство электроэнергии на соответствующий период. Исходная информация для планирования включает в себя ряд блоков. В том числе прогнозируется величина потребления электроэнергии и мощности; оцениваются возможные величины тарифов на электрическую энергию и мощность, закупаемые на федеральном рынке (ФОРЭМ), на планируемый период; оценивается возможная структура топливного баланса ТЭЦ с учетом существования лимитов на поставки природного газа (наиболее дешевого вида топлива); а также формируется прогноз цены на каждый вид натурального топлива (газ, мазут, уголь).

Как правило, прогноз значений указанных параметров на период планирования характеризуется значительной неопределенностью, которая не имеет вероятностного (случайного) характера. В этих условиях для планирования основных производственных показателей, включая оптимизацию распределения нагрузки по станциям энергосистемы, на практике используются вариантные расчеты, которые представляют собой, по существу, однофакторные эксперименты. При наличии неопределенности в значениях целой системы определяющих параметров методика однофакторного сканирования возможных интервалов их изменения не позволяет оценить ожидаемые значения интегральных технико-экономических показателей. В то же время для формальных операций с величинами, не обладающими определенными числовыми значениями, существуют специальные математические аппараты, относящиеся к разделам теории нечетких множеств и интервальной математике. Начиная с классической работы Л. Заде [1], аппарат теории нечетких множеств строится на основе различных вариантов формализации качественных оценок "предпочтительности" или "возможности" тех или ситуаций. В ситуации, рассматриваемой в данной работе, как правило, отсутствует дополнительная информация о "степени возможности" тех или иных значений определяющих факторов, или, по крайней мере, для получения таких оценок требуются дополнительные исследования. На первом этапе при формировании производственных планов могут быть указаны лишь возможные пределы изменения тех или иных определяющих параметров. В этом случае наиболее удобным аппаратом, по мнению авторов, является аппарат интервальной математики [2, 3].

Исходными элементами процесса планирования технико-экономических показателей энергосистемы являются балансы электроэнергии и мощности, которые определяют величину оптимальной нагрузки собственных ТЭЦ и величину закупок электроэнергии и мощности на федеральном рынке (ФОРЭМ). Оптимизация распределения нагрузки при этом производится по критерию минимизации собственных затрат на обеспечение ожидаемой величины потребления

электрической энергии и мощности. При поиске такого оптимального распределения нагрузки целесообразно рассматривать так называемую "переменную составляющую затрат"

$$Z = Z_{\phi}^{\phi} + Z_M^{\phi} + Z_T, \quad (1)$$

где Z_{ϕ}^{ϕ} - затраты на оплату энергии, поставляемой с ФОРЭМ; Z_M^{ϕ} - затраты на оплату мощности, поставляемой с ФОРЭМ; Z_T - топливная составляющая затрат на выработку электроэнергии генерирующими мощностями энергосистемы.

Компоненты затрат в соотношении (1) определяются следующим образом

$$Z_{\phi}^{\phi} = -C_{\phi} \cdot E^{\phi}, \quad (2)$$

$$Z_M^{\phi} = C_M \cdot (-W^{\phi} + gW_{номп}), \quad (3)$$

$$Z_T = \sum_{i=1}^N C_{T,i} \cdot b_i \cdot E_i^e, \quad (4)$$

где C_{ϕ} - стоимость единицы энергии (тариф энергии ФОРЭМ); C_M - стоимость единицы мощности (тариф мощности ФОРЭМ); E^{ϕ} - величина межсистемного сальдо-перетока электроэнергии; W^{ϕ} - величина межсистемного сальдо-перетока мощности; g - коэффициент, устанавливаемый, с целью резервирования мощности в долях от мощности потребления $W_{номп}$; N - количество ТЭЦ; $C_{T,i}$ - цена единицы условного топлива на i -той ТЭЦ; b_i - удельный расход условного топлива на i -той ТЭЦ; E_i^e - выработка электроэнергии i -той ТЭЦ.

Закупки электроэнергии и мощности на ФОРЭМ в энергосистеме необходимы для обеспечения ожидаемой величины потребления электрической энергии $E_{номп}$ и мощности $W_{номп}$, поэтому величины сальдо-перетоков энергии и мощности, а также величины выработки электроэнергии E_i^e и рабочей мощности ТЭЦ W_i^m должны быть связаны между собой следующими балансовыми соотношениями:

$$E^{\phi} = \sum_{i=1}^N E_i^e - E_{номп}; \quad (5)$$

$$W^{\phi} = \sum_{i=1}^N W_i^m - W_{номп}. \quad (6)$$

Величина удельного расхода условного топлива с удовлетворительной точностью может быть описана линейной функцией от соотношения выработки тепловой энергии Q_i и электрической энергии E_i^e :

$$b_i = c_i + d_i \cdot \frac{Q_i}{E_i^e}. \quad (7)$$

Цена единицы условного топлива $C_{T,i}$ определяется структурой топливного баланса и стоимостью каждого вида натурального топлива с учетом наличия лимита на поставку газа и соответственно наличия повышенной, коммерческой цены на сверхлимитный газ. Структура топливного баланса может задаваться как в натуральных, так и в относительных величинах. В последнем случае планируется доля каждого вида натурального топлива в структуре топливного баланса в пересчете на условное топливо. Рассмотрим для простоты лишь последнюю ситуацию. Пусть планируемыми параметрами для каждой ТЭЦ являются следующие величины (в процентах): $d_{z,i}$ - доля газа в структуре топливного баланса в целом, в том числе $d_{z,l,i}$ - доля газа в пределах лимита из всей массы газа и $d_{z,don,i}$ - доля сверхлимитного газа; $d_{m,i}$ - доля мазута в структуре топливного баланса; $d_{y,i}$ - доля угля.

Величины относительных долей должны, очевидно, удовлетворять уравнениям баланса массы:

$$d_{z,l,i} + d_{z,don,i} = 100, \quad (8)$$

$$d_{z,i} + d_{m,i} + d_{y,i} = 100. \quad (9)$$

Вычисление цены единицы условного топлива для каждой ТЭЦ при заданной структуре топливного баланса производится по формуле

$$C_{T,i} = (C_{z,l,i} \cdot \frac{d_{z,l,i}}{100} + C_{z,don,i} \cdot \frac{d_{z,don,i}}{100}) \cdot \frac{d_{z,i}}{100} \cdot K_{z,i} + C_{m,i} \cdot \frac{d_{m,i}}{100} \cdot K_{m,i} + C_{y,i} \cdot \frac{d_{y,i}}{100} \cdot K_{y,i}, \quad (10)$$

где $C_{z,l,i}$, $C_{z,don,i}$, $C_{m,i}$, $C_{y,i}$ - соответственно цена газа в пределах лимита, цена сверхлимитного газа, цена мазута и цена угля (на единицу соответствующего натурального топлива); $K_{z,i}$, $K_{m,i}$, $K_{y,i}$ - коэффициенты тепловых эквивалентов для соответствующего топлива для каждой ТЭЦ.

Оптимальное распределение нагрузки в энергосистеме определяется из условия минимизации затрат

$$Z \rightarrow \min_{(W_i^m, E_i^6)} \quad (11)$$

с учетом соотношений (1) – (10) и дополнительных ограничений на величины рабочей мощности и выработки ТЭЦ

$$(W_i)_{min} \leq W_i^m \leq (W_i)_{max}, (E_i)_{min} \leq E_i^6 \leq (E_i)_{max}, \quad (12)$$

где $(W_i)_{min}$ и $(W_i)_{max}$, $(E_i)_{min}$ и $(E_i)_{max}$ - возможные наименьшее и наибольшее значения рабочей мощности и выработки электроэнергии при заданной тепловой нагрузке.

Соотношения (1) – (10) и (11) – (12) представляют собой математическую модель технико-экономических показателей энергосистемы и постановку задачи минимизации переменной составляющей затрат в энергосистеме в "четкой" постановке. Последнее означает, что при каждом вариантном расчете величины затрат значения всех параметров в модели должны быть определенными.

Практически, однако, целый ряд определяющих исходных параметров в системе уравнений (1) – (10) на этапе планирования известен лишь ориентировочно. К таким параметрам, в первую очередь, относятся тарифы ФОРЭМ C_z , C_m ; величины потребления E_{nomp} , W_{nomp} ; выработка тепловой энергии Q_i ; структура топливного баланса – доли компонент натурального топлива $d_{z,i}$, $d_{z,l,i}$, $d_{z,don,i}$, $d_{m,i}$, $d_{y,i}$; цена каждой компоненты топливного баланса $C_{z,l,i}$, $C_{z,don,i}$, $C_{m,i}$, $C_{y,i}$. Причем, для каждого из этих параметров могут быть заданы лишь ожидаемые граничные значения.

Последнее обстоятельство определяет целесообразность использования методов интервальной математики [2, 3]. Для использования соответствующих алгоритмов каждую из величин в соотношения (1) – (10) будем считать интервальным числом вида $X = [X_1, X_2]$, где X_1 , X_2 - границы соответствующего интервала. Операции интервальной математики достаточно подробно описаны в опубликованных работах, однако система уравнений (1) – (10) не может быть механически переписана в интервальной постановке. Эта особенность рассматриваемой задачи определяется наличием уравнений баланса массы (8), (9), которые, по их физическому смыслу, должны точно выполняться даже в интервальной постановке, т.е. сумма интервалов должна быть точным числом.

Следовательно, интервальные представления ряда компонентов исходных данных - величин $d_{z,i}$, $d_{z,l,i}$, $d_{z,don,i}$, $d_{m,i}$, $d_{y,i}$ - должны быть согласованы в смысле соотношений (8), (9), которые, таким образом, приобретают смысл уравнений относительно интервальных чисел. Этим соотношениям в интервальной постановке соответствуют следующие системы уравнений:

$$d_{z,l,i} + d_{z,don,i} = 100; \quad (13)$$

$$(d_{z,l,i})_{min} \leq d_{z,l,i} \leq (d_{z,l,i})_{max}, (d_{z,don,i})_{min} \leq d_{z,don,i} \leq (d_{z,don,i})_{max}; \quad (14)$$

$$d_{z,i} + d_{m,i} + d_{y,i} = 100; \quad (15)$$

$$(d_{z,i})_{min} \leq d_{z,i} \leq (d_{z,i})_{max}, (d_{m,i})_{min} \leq d_{m,i} \leq (d_{m,i})_{max}, (d_{y,i})_{min} \leq d_{y,i} \leq (d_{y,i})_{max}, \quad (16)$$

где для каждого "интервального" числа индексы "min" и "max" связаны с границами интервалов соотношениями $X_{min} = \min(X_1, X_2)$, $X_{max} = \max(X_1, X_2)$.

Таким образом, прогнозируемые вариации компонент структуры топливного баланса (интервальные представления структуры топливного баланса) должны удовлетворять системам уравнений и неравенств (13) - (16). Вычисление цены единицы условного топлива $C_{T,i}$ не может быть произведено по "интервальному" эквиваленту соотношения (10). В случае неопределенности, нечеткости исходной информации, представленной в интервальной форме, составляющие затрат также являются интервалами, поэтому оптимизационная задача (11) также должна быть переформулирована.

Алгоритм оценки диапазона изменения переменных составляющих затрат и оптимизации распределения нагрузки в энергосистеме в случае интервального представления исходной нечеткой информации может быть представлен в виде следующей последовательности шагов.

1. Задаются значения и возможные диапазоны изменения исходных параметров функционирования энергосистемы – параметров математической модели. Диапазоны изменения задаются, в частности, для величин тарифов ФОРЭМ C_{ε} , C_M ; величин потребления $E_{номр}$, $W_{номр}$; выработки тепловой энергии Q_i ; структуры топливного баланса – доли компонент натурального топлива $d_{\varepsilon,i}$, $d_{\varepsilon,л,i}$, $d_{\varepsilon,дон,i}$, $d_{м,i}$, $d_{у,i}$; цены каждой компоненты топливного баланса $Ц_{\varepsilon,л,i}$, $Ц_{\varepsilon,дон,i}$, $Ц_{м,i}$, $Ц_{у,i}$.

2. Заданные интервальные представления компонент топливного баланса (величин $d_{\varepsilon,i}$, $d_{\varepsilon,л,i}$, $d_{\varepsilon,дон,i}$, $d_{м,i}$, $d_{у,i}$) корректируются путем решения систем уравнений и неравенств (13) – (16). Необходимо отметить, что в силу нечеткости исходной информации первоначально заданные интервальные представления могут не удовлетворять уравнению баланса массы, поэтому обе границы соответствующих интервалов должны быть скорректированы. Например, для соотношений (13), (14) возможные варианты взаимного расположения прямой (13) и области (14) иллюстрируются рисунком.

Варианты взаимного расположения прямой (13) и области (14)

Прямая (13) располагается ниже и левее прямоугольника (14). В этом случае система несовместна и

$$x(A) < (d_{\varepsilon,л,i})_{\min},$$

$$y(B) < (d_{\varepsilon,дон,i})_{\min},$$

где $x(A)$, $y(B)$ – абсцисса и ордината точек A, B. В этом случае нижние границы интервалов $d_{\varepsilon,л,i}$, $d_{\varepsilon,дон,i}$ должны быть уменьшены.

Прямая (13) пересекает прямоугольник (14). В этом случае скорректированные интервалы $d_{\varepsilon,л,i}$, $d_{\varepsilon,дон,i}$ определяются соотношениями

$$x(A) \leq d_{\varepsilon,л,i} \leq (d_{\varepsilon,л,i})_{\max};$$

$$y(B) \leq d_{\varepsilon,дон,i} \leq (d_{\varepsilon,дон,i})_{\max}.$$

Прямая (13) располагается выше и правее прямоугольника (14) – (15). В этом случае система несовместна: $x(A) > (d_{\varepsilon,л,i})_{\max}$, $y(B) > (d_{\varepsilon,дон,i})_{\max}$. Здесь верхние границы интервалов $d_{\varepsilon,л,i}$, $d_{\varepsilon,дон,i}$ должны быть увеличены.

Ограничения (15), (16) также требуют анализа и корректировки заданных априорно прогнозируемых диапазонов изменения составляющих топливного баланса.

3. Рассчитывается диапазон изменения цены единицы условного топлива для каждой ТЭЦ ($C_{T,i}$). В связи с наличием в структуре математической модели уравнений баланса массы (13),

(14) построение соответствующего интервала также не может быть выполнено формальными средствами интервальной математики.

Соответствующие границы интервалов определяются путем решения задач математического программирования следующего вида:

$$(C_{T,i})_{\min} = \min \left(\Pi_{z,l,i} \cdot \frac{d_{z,l,i}}{100} + \Pi_{z,don,i} \cdot \frac{d_{z,don,i}}{100} \cdot \frac{d_{z,i}}{100} \cdot K_{z,i} + \right. \\ \left. + \Pi_{m,i} \cdot \frac{d_{m,i}}{100} \cdot K_{m,i} + \Pi_{y,i} \cdot \frac{d_{y,i}}{100} \cdot K_{y,i} \right); \quad (17)$$

$$(C_{T,i})_{\max} = \max \left(\Pi_{z,l,i} \cdot \frac{d_{z,l,i}}{100} + \Pi_{z,don,i} \cdot \frac{d_{z,don,i}}{100} \cdot \frac{d_{z,i}}{100} \cdot K_{z,i} + \right. \\ \left. + \Pi_{m,i} \cdot \frac{d_{m,i}}{100} \cdot K_{m,i} + \Pi_{y,i} \cdot \frac{d_{y,i}}{100} \cdot K_{y,i} \right); \quad (18)$$

$$d_{z,l,i} + d_{z,don,i} = 100; \quad (19)$$

$$(d_{z,l,i})_{\min} \leq d_{z,l,i} \leq (d_{z,l,i})_{\max}, (d_{z,don,i})_{\min} \leq d_{z,don,i} \leq (d_{z,don,i})_{\max}; \quad (20)$$

$$d_{z,i} + d_{m,i} + d_{y,i} = 100; \quad (21)$$

$$(d_{z,i})_{\min} \leq d_{z,i} \leq (d_{z,i})_{\max}, (d_{m,i})_{\min} \leq d_{m,i} \leq (d_{m,i})_{\max}, (d_{y,i})_{\min} \leq d_{y,i} \leq (d_{y,i})_{\max}; \quad (22)$$

$$(\Pi_{z,l,i})_{\min} \leq \Pi_{z,l,i} \leq (\Pi_{z,l,i})_{\max}, (\Pi_{z,don,i})_{\min} \leq \Pi_{z,don,i} \leq (\Pi_{z,don,i})_{\max}; \quad (23)$$

$$(\Pi_{m,i})_{\min} \leq \Pi_{m,i} \leq (\Pi_{m,i})_{\max}, (\Pi_{y,i})_{\min} \leq \Pi_{y,i} \leq (\Pi_{y,i})_{\max}. \quad (24)$$

4. При заданных интервалах изменения планируемых величин выработки и нагрузки ТЭЦ E_i^a , W_i^m , определяемых соотношениями (12), и величин потребления $E_{номп}$, $W_{номп}$, а также с учетом полученных оценок интервалов изменения остальных параметров (17) – (24) ожидаемые интервалы изменения переменных составляющих затрат $3, 3_{\mathcal{O}}^{\Phi}, 3_M^{\Phi}, 3_T$ рассчитываются формальными средствами интервальной математики [2, 3].

5. Задача выбора оптимальных величин нагрузок ТЭЦ из условия минимума переменной составляющей затрат в интервальной постановке требует дополнительной конкретизации, так как само понятие "оптимальности" не может быть в этом случае описано соотношениями (11). В действительности интервальная формулировка математической модели объекта порождает целый спектр оптимизационных задач.

В данном случае возможной представляется задача построения "гарантированного" решения, которая может быть представлена как минимаксная задача поиска распределения нагрузки (вектора W_i^m , $i = 1, \mathbf{K}, N$), обеспечивающего минимальное значение верхней границы интервала изменения затрат 3 во всей возможной области изменения определяющих параметров модели ($E_{номп}$, $W_{номп}$, Q_i , $C_{\mathcal{O}}$, C_M , $d_{z,i}$, $d_{z,l,i}$, $d_{z,don,i}$, $d_{m,i}$, $d_{y,i}$, $\Pi_{z,l,i}$, $\Pi_{z,don,i}$, $\Pi_{m,i}$, $\Pi_{y,i}$), т.е.

$$3 = \max_{(E_{номп}, W_{номп}, Q_i, C_{\mathcal{O}}, C_M, \Pi)} (3_{\mathcal{O}}^{\Phi} + 3_M^{\Phi} + 3_T) \rightarrow \min_{(W_i^m)}, \quad (25)$$

где символом Π обозначен вектор интервалов цен единицы условного топлива для всех ТЭЦ.

В данном случае специфическая структура модели удельного расхода условного топлива (7) позволяет свести задачу (25) к задаче линейного программирования по вектору нагрузок W_i^m . Линейность формы (1) по каждому из остальных параметров задачи приводит к следующему оптимальному в смысле (25) распределению нагрузки:

$$W_i^m = \begin{cases} (W_i)_{\max}, & \text{если } T \cdot k_i \cdot ((\Pi_i)_{\max} \cdot c_i - (C_{\mathcal{O}}^{\Phi})_{\max}) - (C_{\mathcal{O}}^{\Phi})_{\max} \leq 0; \\ (W_i)_{\min}, & \text{если } T \cdot k_i \cdot ((\Pi_i)_{\max} \cdot c_i - (C_{\mathcal{O}}^{\Phi})_{\max}) - (C_{\mathcal{O}}^{\Phi})_{\max} > 0, \end{cases} \quad (26)$$

где T – длительность периода планирования (в часах); c_i – коэффициент в соотношении (7); k_i – коэффициент заполнения графика генерации (в данной постановке задачи считается "точечным" числом).

Таким образом, в данной работе описана структура математической модели переменных составляющих затрат региональной энергодефицитной энергосистемы с учетом нечеткости определяющих параметров. Построены алгоритмы вычислений компонент затрат при интерваль-

ном задании исходной информации. Поставлена и решена в минимаксной форме задача оптимального планирования. Разработанный алгоритм оценки и оптимизации диапазона изменения переменных составляющих затрат реализован в виде программного обеспечения в среде MS Fortran PowerStation v. 4.0 и может быть использован в качестве вычислительного ядра в программных комплексах планирования технико-экономических показателей энергосистем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 164 с.
2. *Шокин Ю.И.* Интервальный анализ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1981. 112 с.
3. *Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х.* Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение. 1986. 223 с.