Задача оптимального обеспечения топливом предприятий энергетической промышленности с учетом качества энергоносителей

Ю.В.Кириллов, С.А.Кудаев

Новосибирский государственный технический университет

1. Введение

В современных условиях энергетические предприятия вынуждены строить свою работу с учетом конъюнктуры рынка энергоносителей, который в последнее время неуклонно расширяется. Например, предприятие ОАО «Новосибирскэнерго» ТЭЦ-2 закупает энергетический уголь на угольном рынке Кузбасса, который сегодня представляет собой 10 крупных угольных компаний, ряд самостоятельных фирм, объединяющий 47 шахт и 26 разрезов, 40 обогатительных фабрик и установок, а также ряд более мелких предприятий. Все они предлагают широкий ассортимент своей продукции – углей различных сортов, разной цены и соответствующего качества.

В условиях несвоевременной оплаты конечными потребителями услуг за произведенную электроэнергию ОАО «Новосибирскэнерго» часто испытывает финансовые затруднения и поэтому вынуждено закупать более дешевый, но некачественный уголь. Однако, как выяснили специалисты ТЭЦ, это приводит к тому, что возрастают удельные затраты на производство тепло- и электроэнергии в то время, как выход конечной продукции уменьшается. Более того, по подсчетам специалистов ОАО «Новосибирскэнерго», иногда убытки энергосистемы из-за потребления некачественного угля превышают выигрыш от покупки более дешевых энергоносителей.

Отсюда возникает задача оптимального выбора энергопредприятиями таких сортов угля, при использовании которых будет найден компромиссный вариант из следующих альтернатив:

а) максимизация прибыли от производства тепловой и электрической энергии;

б) минимизация затрат на закупку и транспортировку энергоносителей;

в) минимизация затрат на потери при производстве тепло- и электроэнергии, связанные с качеством потребляемого угля.

Задачи такого рода являются многокритериальными (векторными) задачами оптимизации, оригинальный алгоритм решения которых был предложен в [1] и развит в [2]. В данной работе рассмотрен числовой пример его реализации для решения важной прикладной задачи.

2. Постановка векторной задачи

Пусть x_i $(i=\overline{1,n})$ - доля количества угля i-го сорта в общем объеме закупаемых энергоносителей, а p_i - цена за 1тонну соответствующего сорта, включая транспортировку. Качество угля определяется двумя основными параметрами: a_i - % содержания золы и b_i - % содержания влаги в единице веса i-го сорта. Для нормальной работы оборудования ТЭЦ-2 установлены соответствующие нормативы на допустимые значения этих параметров: a_0 =16% и b_0 =8%. Специалистами ТЭЦ-2 были рассчитаны коэффициенты удельного выхода электрической (d_i) и тепловой энергии (c_i) при сжигании в котлоагрегатах 1 тонны угля i -го сорта. Значения этих параметров для основных сортов используемого угля приведены в таблице 4.1.

Таблица 1

№	Сорт угля	% содержания золы	% содержания влаги	Удельный выход электроэнергии, квт/час/тонна	Удельный выход теплоэнергии, Гкал/тонна	Цена за 1 тонну, руб.
1	ССсш	22,1	11,3	1532,12	1,465	439
2	ССр	21,4	11,0	1536,79	1,478	456
3	ССмсш	20,1	10,8	1539,23	1,478	471
4	ССомсш	18,0	10,0	1560,22	1,493	502
5	Сcрок1	17,5	9,0	1566,12	1,499	528
6	Томсш	17,3	8,8	1567,92	1,500	543
7	Тр	17	8,5	1570,62	1,503	569

Кроме того, были определены коэффициенты потерь, характеризующие уменьшение удельной выработки электрической (K_1) и тепловой (K_2)энергии при увеличении содержания золы на 1%, а также аналогичные коэффициенты потерь (K_3 и K_4 соответственно) при увеличении содержания влаги на 1%.

Таким образом, необходимо найти компромисс между максимальной выработкой электрической энергии

$$\sum_{i=1}^{n} c_i x_i \to \max , \qquad (2.1)$$

тепловой энергии

$$\sum_{i=1}^{n} d_i x_i \to \max , \qquad (2.2)$$

минимумом потерь от увеличения зольности при выработке электроэнергии и тепла

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_0)\,x_i\right]K_1 \to \min \qquad (2.3)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(a_i - a_0)\,x_i\right]K_2 \to \min, \qquad (2.4)$$

а также минимумом потерь при выработке тепло- и электроэнергии от увеличения влажности

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(b_i - b_0)\,x_i\right]K_3 \to \min, \qquad (2.5)$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}(b_i - b_0)\,x_i\right]K_4 \to \min, \qquad (2.6)$$

и, конечно, минимумом затрат на покупку и транспортировку

$$\sum_{i=1}^{n} p_i x_i \to \min. \qquad (2.7)$$

Выбор необходимо сделать при условии, что

$$\sum_{i=1}^{n} x_i = 1. \qquad (2.8)$$

При этом нумерация переменных производится в соответствии с порядковым номером сорта угля, представленного в таблице 1. В результате имеем следующую линейную неоднородную задачу векторной оптимизации:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} c_i x_i \to \max \\ \sum_{i=1}^{n} d_i x_i \to \max \\ \sum_{i=1}^{n} (a_i - a_0)\,x_i \to \min \\ \sum_{i=1}^{n} (b_i - b_0)\,x_i \to \min \\ \sum_{i=1}^{n} p_i x_i \to \min \\ \sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \end{cases} \qquad (2.9)$$

3. Решение векторной задачи

Используя в (2.9) данные таблицы 1, получаем следующую числовую модель векторной задачи:

$$
\begin{cases}
1,465x_1 + 1,469x_2 + 1,478x_3 + 1,493x_4 + 1,499x_5 + 1,500x_6 + 1,504x_7 \to \max \\
1532,12x_1 + 1536,79x_2 + 1539,23x_3 + 1560,22x_4 + 1566,12x_5 + \\
+1567,92x_6 + 1570,62x_7 \to \max \\
0,061x_1 + 0,054x_2 + 0,041x_3 + 0,02x_4 + 0,015x_5 + 0,013x_6 + 0,01x_7 \to \min \\
0,033x_1 + 0,031x_2 + 0,028x_3 + 0,02x_4 + 0,01x_5 + 0,008x_6 + 0,005x_7 \to \min \\
439x_1 + 456x_2 + 471x_3 + 500x_4 + 528x_5 + 543x_6 + 569x_7 \to \min \\
\sum_{i=1}^{n} x_i = 1
\end{cases}
\tag{3.1}
$$

Решим задачу (3.1) методом гарантированного результата при нормализации критериев (ГРНК) как линейную неоднородную задачу векторной оптимизации с равнозначными критериями [1]. Для автоматизации процесса решения была выбрана программа электронных таблиц Excel 9.0 из пакета MS Office XP (2002). В соответствии с алгоритмом решения таких задач [1]необходимо выполнить следующие этапы вычислений.

1. Решаем скалярные задачи оптимизации для каждого критерия с помощью модуля «Поиск решения» таблиц Excel 9.0 и определяем значения и координаты его максимума и минимума. Получаем:

$$f_1^{\max}(X_1^{\max}) = 1{,}504;\ \ X_1^{\max} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),\ \ f_1^{\min}(X_1^{\min}) = 1{,}465;\ \ X_1^{\min} = (1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0),$$

$$f_2^{\max}(X_2^{\max}) = 1570{,}62;\ \ X_2^{\max} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),\ \ f_2^{\min}(X_2^{\min}) = 1532{,}12;\ \ X_2^{\min} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),$$

$$f_3^{\max}(X_3^{\max}) = 0{,}061;\ \ X_3^{\max} = (1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0),\ \ f_3^{\min}(X_3^{\min}) = 0{,}01;\ \ X_3^{\min} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),$$

$$f_4^{\max}(X_4^{\max}) = 0{,}033;\ \ X_4^{\max} = (1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0),\ \ f_4^{\min}(X_4^{\min}) = 0{,}005;\ \ X_4^{\min} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),$$

$$f_5^{\max}(X_5^{\max}) = 569;\ \ X_5^{\max} = (0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1),\ \ f_5^{\min}(X_5^{\min}) = 439;\ \ X_4^{\min} = (1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0).$$

2. Производим нормализацию критериальных функций, получаем их относительные оценки $l_1(X), l_2(X), \overline{l}_3(X), \overline{l}_4(X), \overline{l}_5(X)$.

3. Формируем l - задачу для получения единственного Парето-оптимального решения (3.1):

$$
\begin{cases}
l \to \max \\
l - l_1(X) \le 0 \\
l - l_2(X) \le 0 \\
l - \overline{l}_3(X) \le 0 \\
l - \overline{l}_4(X) \le 0 \\
l - \overline{l}_5(X) \le 0 \\
\sum_{i=1}^{n} x_i = 1
\end{cases}
\tag{3.2}
$$

Решение l - задачи приведено на рис. 1. Координаты компромиссного решения равнозначной задачи:

$$X^{0}_{eqv} = (0,336;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0,667;\ 0;\ 0\ ).$$

При этом компромиссные значения относительных оценок критериев будут гарантированно не хуже $l = 0,545$. Действительно:

$$l_1\left(X^{0}_{eqv}\right) = 0,578;\ l_2\left(X^{0}_{eqv}\right) = 0,588;\ \bar{l}_3\left(X^{0}_{eqv}\right) = 0,598;$$

$$\bar{l}_4\left(X^{0}_{eqv}\right) = 0,545;\ \bar{l}_5\left(X^{0}_{eqv}\right) = 0,545$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
114		Решение равнозначной векторной задачи							
116	λ	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	max
117	0,545421	0,3360088	0	0	0	0,6639912	0	0	0,545421379
119	1	0	0	0	0	0	0	0	коэф.ЦФ
121				Ограничения					
122				лев.часть	знак	прав.часть.			
124			$\lambda-\lambda_1(X)$	-0,033443	$\le$	0			
126			$\lambda-\lambda_2(X)$	-0,042685	$\le$	0			
128			$\lambda-\bar{\lambda}_3(X)$	-0,053473	$\le$	0			
130			$\lambda-\bar{\lambda}_4(X)$	0,000000	$\le$	0			
132			$\lambda-\bar{\lambda}_5(X)$	0,000000	$\le$	0			
135			$\sum_{i=1}^{n} x_i$	1	=	1			

Рис. 1

Таким образом, для получения оптимального решения необходимо закупать уголь 1 сорта в количестве 33,6% от общего объема и 66,4% угля 5 сорта. При этом общие затраты на закупку составят 54,5% от максимальной стоимости, затраты на потери от повышенной влажности составят 54,5% от максимальных, затраты на потери от повышенной зольности составят 59,8% от максимальных, производство тепловой энергии будет на уровне 58,8% от максимума, а производство электроэнергии – на уровне 57,8% от того максимума, который был бы достигнут, если в качестве единственного критерия выбрать только общий объем выработанной ТЭЦ-2 электрической энергии.

4. Поставим теперь задачу улучшить найденное компромиссное решение. Пусть ЛПР желает непременно уменьшить затраты на покупку энергетического угля даже за счет значений по остальным критериям. Для этого, в соответствии с алгоритмом решения неравнозначной линейной задачи векторной оптимизации [2], необходимо увеличить значение относительной оценки по 5-му критерию, ухудшив значения остальным критериев с помощью коэффициентов приоритета 5-го критерия по отношению к ним. Вычисление необходимых пределов коэффициентов приоритета представлено на рис. 2.

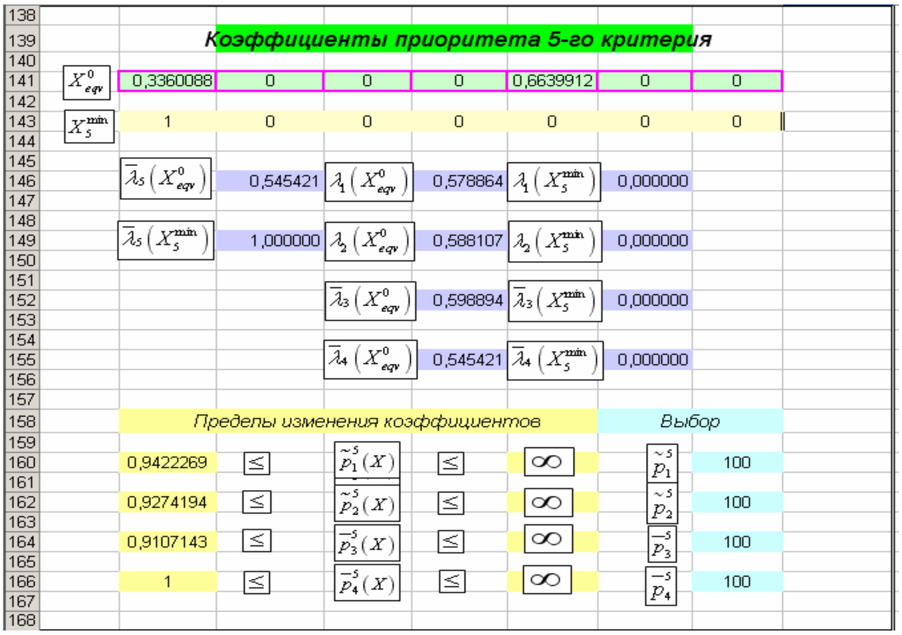

Рис. 2

В результате получим

$$0,942 \le \tilde{p}_1^{5} \le \infty;\ 0,927 \le \tilde{p}_2^{5} \le \infty;\ 0,91 \le \overline{p}_3^{5} \le \infty;\ 1 \le \overline{p}_4^{5} \le \infty.$$

5. Формируем вектор коэффициентов приоритета в найденных пределах

$$P^5 = (100;\ \ 100;\ \ 100;\ \ 100;\ 1)$$

и строим l - задачу с неравнозначными критериями:

$$\begin{cases} l \ \to \max \\ l - 100\, l_1(X) \le 0 \\ l - 100\, l_2(X) \le 0 \\ l - 100\, \overline{l}_3(X) \le 0 \\ l - 100 \cdot \overline{l}_4(X) \le 0 \\ l - \overline{l}_5(X) \le 0 \\ \sum_{i=1}^{n} x_i = 1 \end{cases} \tag{3.3}$$

Решение неравнозначной задачи приведено на рис 3. В результате получим новые координаты Парето-оптимального решения:

$$X^0_{noneqv} = (0,988;\ 0;\ \ 0;\ \ 0;\ \ 0,012;\ \ 0;\ 0).$$

Т.е., в этом случае угля 1 сорта следует закупать уже в количестве 98,8% от общего объема, а угля 5 сорта только 0,12%. Как видно, значение 5-го критерия явно улучшается и лишь на 1% больше своего локального минимума.

168									
169									
170	***Решение неравнозначной векторной задачи с приоритетом 5-го критерия***								
171									
172	λ	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	*max*
173	0,991734	0,9879267	0	0	0	0,0120733	0	0	0,991734441
174									
175	1	0	0	0	0	0	0	0	коэф.ЦФ
176									
177			***Ограничения***						
178			лев.часть	знак	прав.часть.			$f_i(X^0_{eqv})$	$f_i(X^0_{noneqv})$
179									
180		$\lambda-\widetilde{p}^5_1\lambda_1(X)$	-0,060809	$\le$	0	$\lambda_1(X)$	0,010525	1,4875757	1,465410
181									
182		$\lambda-\widetilde{p}^5_2\lambda_2(X)$	-0,077614	$\le$	0	$\lambda_2(X)$	0,010693	1554,7621	1532,531699
183									
184		$\lambda-\overline{p}^5_3\overline{\lambda}_3(X)$	-0,097229	$\le$	0	$\overline{\lambda}_3(X)$	0,010890	0,0304564	0,060445
185									
186		$\lambda-\overline{p}^5_4\overline{\lambda}_4(X)$	0,000000	$\le$	0	$\overline{\lambda}_4(X)$	0,009917	0,0177282	0,032722
187									
188		$\lambda-\overline{\lambda}_5(X)$	0,000000	$\le$	0	$\overline{\lambda}_5(X)$	0,991734	498,09522	440,074523
189									
190		$\sum_{i=1}^{n} x_i$	1	$=$	1				
191									
192									
193									

Рис. 3

Однако значения других критериев стали хуже: затраты на потери от повышенной влажности и зольности возросли до 99% от максимума, выработка тепловой и электрической энергии снизились до значений лишь на 1% превышающих минимально возможные. Тем не менее, цель достигнута: значение критерия 5 явно улучшилось по сравнению с равнозначной задачей.

4. Выводы

Таким образом, метод ГРНК является действенным инструментом для принятия оптимальных решений в сложных условий многокритериального выбора. Следует отметить, что вычисляемые коэффициенты приоритета являются эффективным средством целенаправленного изменения значений компромиссного решения, в первую очередь его улучшения. Это является дополнительным плюсом для практического использования алгоритмов метода ГРНК, так как значительно снижает субъективизм в принятии решений по такому важному вопросу, как приоритет определенного критерия.

Литература

1. Иванов Л.Н., Кириллов Ю.В. К вопросу о Парето-оптимальности решений задач векторной оптимизации // Сборник научных трудов НГТУ, 2003, №3, стр. 61-74.
2. Кириллов Ю.В. Методы многокритериальной оптимизации в информационных технологиях анализа инновационной деятельности // «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2004: Тр. VII междунар. конф., Новосибирск, 21-24 сент., 2004 – Изд-во НГТУ, 2004. – Т. 7. – стр. 84 – 88.