

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Введение

Энергосбережение является одним из основных факторов повышения эффективности работы любого, в том числе и угледобывающего предприятия. Недостаточный уровень эффективности использования электроэнергии приводит к увеличению себестоимости добычи угля или к снижению качества продукции. Экономия электрической энергии позволяет покрыть часть дефицита максимальной электрической нагрузки в электроэнергетической системе без дополнительных расходов энергоресурсов.

Существует два основных направления повышения уровня эффективности использования энергоресурсов: снижение затрат

энергии и интенсификация технологических процессов, направленная на опережение роста производительности по сравнению с ростом общего расхода электроэнергии. В обоих случаях достигается снижение удельных расходов электроэнергии на технологический процесс. Непроизводительные потери, как правило, очевидны, и если для их устранения не требуется значительных капитальных вложений, проводят организационно-технические мероприятия по экономии электроэнергии. Кроме того, особенности технологии подземных горных работ ограничивают возможности снижения удельных расходов электроэнергии путем интенсификации технологических процессов.

Анализ показывает, что значительное снижение удельного расхода электроэнергии наблюдается при создании энергосберегающих технологий путем установления такого уровня параметров технологического процесса, связанных с режимом электропотребления, которые обеспечивают минимум электроэнергии при сохранении объема выпускаемой продукции [1].

Для условий угледобывающих предприятий предлагается следующий подход нахождения оптимальных параметров объекта проектирования с учетом критериев энергоэффективности, производительности и себестоимости [2, 3]:

- исследование технологических параметров, в значительной мере определяющих режим электропотребления и допускающих целенаправленное изменение в ограниченных пределах;
- построение математических оптимизационных многокритериальных моделей исследуемого объекта проектирования;
- нахождение оптимальных значений при ограничениях, накладываемых на технологические параметры.

Такой подход к проблеме энергосбережения не требует значительных капиталовложений и его можно считать как эффективный путь совершенствования технологии с точки зрения энергосбережения.

Построение математической модели оптимизации технологических параметров горнодобывающих предприятий

Анализ однотипных по технологии и однородных по электропотреблению групп угольных шахт показывает, что такими критериями могут быть удельное электропотребление \mathcal{E}_y , производительность Π , себестоимость C , т.е. надо решать следующую многокритериальную задачу:

$$Q(X) = (q_1(X), \dots, q_k(X)) \rightarrow \max, \quad x \in D; \quad (1)$$

$$D: h_j(X) \geq 0, \quad j = 1, \dots, m.$$

Здесь X - искомое решение: $q_i(X)$ ($i = 1, \dots, k$) - функция (критерии) качества решения X ; $h_j(X) \geq 0$ ($j = 1, \dots, m$) - ограничения, устанавливающие допустимую область D возможных изменений решения X . Поскольку наблюдается множество допустимых решений D , задачу (1) можно отнести к векторной или многокритериальной оптимизации [4 - 8].

Для построения простых и надежных оптимизационных моделей весьма важно выбрать управляемые факторы. В общем случае они должны быть:

- представительными, т.е. наиболее точно характеризовать производственный процесс;
- связанными с целевой функцией;
- высоко чувствительными и существенными (несущественные или мало чувствительные факторы лучше перевести в категорию неуправляемых или в ограничения);
- составляющими простые соотношения, не усложняющие модель;
- измеримыми (неизмеримые относят к внешним факторам);
- связанными с конкретным объектом управления (добычной участок, комбайн и т.д.);
- показывающими степень их влияния в процессе эксплуатации.

Анализ информативного факторного поля, влияющего на режим электропотребления угольных шахт, показывает целесообразность включения следующего набора важнейших управляемых в определенном диапазоне факторов: годовой добычи угля x_1 , длины лавы x_2 , суточной нагрузки на очистной забой x_3 и численности персонала x_4 .

Тогда с учетом принятых критериев и управляемых факторов многокритериальную задачу можно представить в общем виде:

$$\mathcal{E}_y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min,$$

$$\Pi = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$C = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min,$$

при ограничениях

$$x_{in} \leq x_i \leq x_{is}, \quad x_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n,$$

где \mathcal{E}_y , Π и C - удельное электропотребление, производительность труда рабочего (за месяц) и себестоимость 1 т угля;

x_1, \dots, x_n - искомые технологические параметры с нижним x_{in} и верхним x_{is} допустимыми значениями.

В основу построения функции цели положен множественный регрессионный анализ, позволяющий качественно и количественно определить влияние на принятые

критерии энергоэффективности угольных шахт.

Тогда регрессионные модели имеют вид:

$$Эу = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + a, \quad (3)$$

$$П = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + a_P, \quad (4)$$

$$С = s_1x_1 + s_2x_2 + s_3x_3 + s_4x_4 + a_C, \quad (5)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4 - неизвестные постоянные коэффициенты регрессии модели Эу;

c_1, c_2, c_3, c_4 - то же, но модели П;

s_1, s_2, s_3, s_4 - то же, но модели С;

x_1, x_2, x_3, x_4 - наблюдаемые значения управляемых переменных;

a - неизвестная случайная ошибка для управляемых переменных.

По результатам статистических данных угольных шахт Западного Донбасса расчетные значения коэффициентов моделей Эу, П и С приведены в табл. 1.

Для установления адекватности оптимизационных моделей Эу, П и С реальным условиям шахтной производственной системы, т.е. обоснования правильности выбора их вида и степени полезности параметров b_i, c_i, s_i принят множественный коэффициент корреляции R.

При этом предполагается наличие линейных связей как между результативным признаком и всеми факторами в отдельности, так и между самими факторными признаками.

Приведем результаты расчета коэффициента корреляции, выражающего зависимость удельных расходов электроэнергии Эу от четырех факторов: $x_1; x_2; x_3; x_4$. Парные коэффициенты для модели Эу представлены в табл. 2.

Ошибка множественного коэффициента корреляции связи результативного признака с четырьмя факторными признаками составляет 0,067 при доверительном числе $t=11,8$, что говорит об устойчивом характере изучаемых связей на шахте ГХК "Павлоградуголь".

Существенность множественного коэффициента корреляции можно проверить по F-критерию Фишера, который представляет собой соотношение факторной и случайной дисперсий.

В табл. 3 приведены результаты оценки меры эффективности коэффициентов R оптимизируемых моделей Эу, П и С и существенности F рассчитанных множественных коэффициентов корреляции $R_Э, R_П$ и $R_С$.

Таблица 1
Расчетные значения коэффициентов регрессионных моделей Эу, П и С

Модель	Эу				П				С			
	b_1	b_2	b_3	b_4	c_1	c_2	c_3	c_4	s_1	s_2	s_3	s_4
Знач. коэф.	$0,8 \times 10^{-2}$	-0,121	$-0,3 \times 10^{-1}$	$0,11 \times 10^{-1}$	$0,4 \times 10^{-1}$	$-0,2 \times 10^{-1}$	$0,24 \times 10^{-1}$	$-0,13 \times 10^{-1}$	$-0,3 \times 10^{-1}$	-0,154	$-0,5 \times 10^{-1}$	$0,31 \times 10^{-1}$

Таблица 2
Парные коэффициенты корреляции по данным угольных шахт ГХК "Павлоградуголь"

Признаки	Эу	x_1	x_2	x_3	x_4
Эу	1	-0,865	0,725	-0,486	0,326
x_1		1	0,667	0,465	-0,438
x_2			1	0,621	0,311
x_3				1	0,231
x_4					1

Таблица 3

Результаты расчета значений R и F оптимизационных моделей Эу, П и С

Множественный коэффициент корреляции			Значение F-критерия			
R_{Σ}	$R_{П}$	$R_{С}$	$F_{расч.Э}$	$F_{расч.П}$	$F_{расч.С}$	$F_{таб.15.4.5}$
0,863	0,791	0,784	10,84	6,25	5,97	5,86

В качестве основного приема решения многокритериальной задачи оптимизации параметров добычных участков принят метод последовательных уступок [9, 10].

Примем в качестве целевой функции удельное электропотребление при условии, что влияющие на него факторы не должны превышать заданные значения $\Pi_{зад}$ и $C_{зад}$. Тогда эту задачу можно записать в виде математической модели:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_y &= 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 \rightarrow \min \\ 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 &\geq \Pi_{зад} \\ -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 &\leq C_{зад} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, i=1...4 \end{aligned} \right\} (6)$$

Результаты решения этой задачи для различных значений $\Pi_{зад}$ и $C_{зад}$ приведены в табл.4.

Анализ данных показывает, что удельное электропотребление снижается по мере роста производительности и незначительного увеличения себестоимости.

Максимизируем производительность добычного участка при наложении ограничений на удельное электропотребление и себестоимость. Тогда математическая модель имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 \rightarrow \max \\ 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 &\leq \mathcal{E}_{y,зад} \\ -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 &\leq C_{зад} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, i=1...4 \end{aligned} \right\} (7)$$

Анализ результатов решения задачи при различных значениях $\mathcal{E}_{y,зад}$ и $C_{зад}$ показывает, что оптимальное значение производительности достигается при $x_1 = 2000$; $x_2 = 100$; $x_3 = 1000$; $x_4 = 1500$.

Таблица 4

Результаты оптимизации модели удельного электропотребления ЭУ

Заданные значения		Расчетные значения				
$\Pi_{зад}$	$C_{зад}$	x_1 , тыс. т	x_2 , м	x_3 , т	x_4 , чел.	\mathcal{E}_y , кВт·ч/т
25	20	700	200	1000	1500	38,15
30	25	762,5	200	1000	1500	37,65
35	30	887,5	200	1000	1500	36,65
40	35	1012,5	200	1000	1500	35,65
45	40	1137,5	200	1000	1500	34,65
50	45	1262,5	200	1000	1500	33,65
55	50	1387,5	200	1000	1500	32,65
60	55	1512,5	200	1000	1500	31,65

Для случая минимизации себестоимости C модель запишется как:

$$\left. \begin{aligned} C &= -0,03x_1 - 0,0154x_2 - 0,05x_3 + 0,031x_4 \rightarrow \min \\ 0,008x_1 - 0,121x_2 - 0,03x_3 + 0,011x_4 &\leq \mathcal{E}_{y_{\text{доб}}} \\ 0,04x_1 - 0,02x_2 + 0,024x_3 - 0,013x_4 &\leq \Pi_{\text{доб}} \\ 700 &\leq x_1 \leq 2000 \\ 100 &\leq x_2 \leq 200 \\ 250 &\leq x_3 \leq 1000 \\ 1500 &\leq x_4 \leq 3500 \\ x_i &\geq 0, i = 1 \dots 4 \end{aligned} \right\} (8)$$

Результаты решения этой задачи при некоторых задаваемых значениях $\mathcal{E}_{y_{\text{доб}}}$ и $\Pi_{\text{доб}}$ свидетельствуют о том, что минимальное значение себестоимости обеспечивается при $x_1 = 2000$; $x_2 = 100$; $x_3 = 1000$; $x_4 = 1500$.

Выводы

1. Анализ факторов, влияющих на уровень эффективности использования электроэнергии на горнодобывающих предприятиях, позволил построить оптимизационные математические модели для основных критериев энергоэффективности: удельного электропотребления ЭУ, производительности П и себестоимости С, способствующие обоснованному принятию проектных и управленческих решений, связанных с повышением уровня эффективности функционирования угледобывающих предприятий.
2. Получены оптимальные значения технологических параметров (годовая добыча, длина лавы, нагрузка на очистной забой, численность персонала), позволяющие повысить адекватность проектных решений по повышению эффективности использования электроэнергии на угледобывающих предприятиях.

Литература

1. Твардовский П.М. Методика оптимизации удельного расхода электроэнергии в алюминиевом производстве: Материалы

- семинара. -М.: МДНТП им.Ф.Э.Дзержинского, 1981. -С.48-52.
2. Пирский А.А. Эффективность подземной добычи угля.-К.:Вища школа,1982.-184 с.
3. Доганов Н.В. Анализ основных факторов, определяющих нагрузку на забой // Уголь. -1978. №4.-С.48-53.
4. Розен В.П., Соловей А.И., Трифонов Д.В. Определение технологической длины лавы в многокритериальном аспекте // Тезисы 1-й международ. научн. – техн. конференции “Математическое моделирование в электротехнике и электроэнергетике”. – Львов, 1995. – С.28
5. Глотов В.А., Гречко В. М., Павельев В.В. Экспериментальное сравнение некоторых методов определения коэффициентов относительной влажности // Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение, 1978. С.156-168.
6. Линейное программирование с многими критериями. Метод ограничений / Р.Бейнаюн, О.И. Ларичев, Ж. де Монгольфье, Ж. Терни // Автоматика и телемеханика. 1971. №8. - С.108-115.
7. Буянов Б.Б., Озерной В.М. Достаточные условия предпочтения в многокритериальных задачах принятия решений // Вопросы кибернетики. Теория принятия решений. М. Советское радио, 1975.
8. Григорян Ф.А., Дарбинян А.А. Общий критерий для оценки ряда модифицированных устройств на основе технико-экономических статистических показателей // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 1969. Вып. 6. С.110-114.
9. Подиновский В.В., Ногин В.Д., Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. -М.: Наука. -982 с.
10. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. -М.: Советское радио, 1975. -192 с.