ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2001. Т. LIV, №3.

УДК 622: 621.3 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М. К. БАГДАСАРЯН

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ГОРНООБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Рассмотрена задача анализа и оптимизации расходов электроэнергии в технологической линии измельчения при разных технологических ситуациях. Предложены математическая модель, алгоритм решения и пакет программ.

Ключевые слова: анализ и оптимизация, энергозатраты, технологическая линия измельчения, платежная матрица.

Расходы электроэнергии в технологической линии измельчения характеризуются следующими особенностями:

- теснота взаимосвязи расходов электроэнергии с качественными и количественными показателями перерабатываемого продукта измельчения;
- нестационарность технологического процесса, обусловленного влиянием различных факторов (влажность руды, организационные неполадки, поступление сырья в неполном объеме), в связи с чем необходимы соответствующие условия переработки;
- цикличность процесса;
- возможность перестройки технологического процесса (изменение коммуникации между операциями и соотношениями объемов работающих мельниц в схеме по стадиям).

Известные работы [1,2], посвященные поискам путей анализа и оптимизации расходов электроэнергии в процессе измельчения [1,2], характеризуются отсутствием комплексного рассмотрения вопроса, что, естественно, не дает требуемого результата.

В настоящей работе предлагается алгоритм для анализа и оптимизации расходов электроэнергии в технологической линии измельчения для разнообразных свойств создаваемой ситуации.

Общие энергозатраты в линии измельчения аккумулируют в себе затраты электроэнергии в операциях с учетом расходов водонасосов на подачу воды (операция измельчения и классификация) и затраты на перекачку пульпы между операциями, которые изменяются в связи с изменением производительности линии и усложнением технологии процесса и схем цепей аппаратов.

Для четкого решения поставленной задачи сформирована модель, в основе которой лежат принципы, согласно чему энергетические показатели каждой операции и между операциями характеризуются определением параметров продукта, выходящего из операций, по известной характеристике входа, числа и типоразмера установленных аппаратов, а также коэффициентов их использования.

В этой связи формализация модели расходов электроэнергии базирована с использованием моделей операций измельчения, классификации и уточнения циркулирующих потоков. Общая структура модели приводится на рис.1, где $W_M(M)$, $W_{Mk}(C)$, $W_k(K)$, $W_{kM}(A)$ - функциональные зависимости, характеризующие расходы электроэнергии по операциям; M(A,B,F), K(C, V) - функциональные зависимости процессов измельчения и классификации, составляющие которых имеют вид

$$B = \{d_0, Q_0, R_0, \delta, T_0, \varphi, \psi, \alpha, r, L_M, D_M, d_g, \gamma\},\ A = \{R_{Si}, T_{Si}, Q_{Si}, V_M\},$$
$$F(\bar{y}),\ C = \{B_M, R_M, T_M, D_P, H_P, L_P\},\ V = \{B_K, V_K, g, L_K, D_K, T_K\},$$

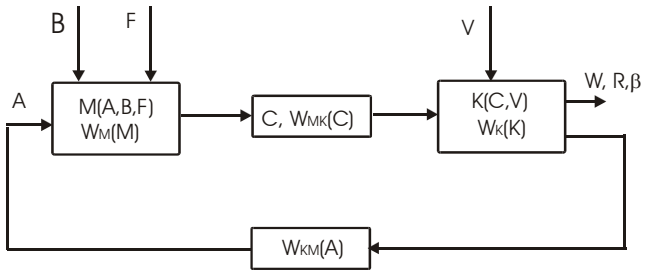

Рис.1. Структурная схема модели формирования расхода электроэнергии

где $d_0, R_0, Q_0, \delta, T_0, \alpha$ - соответственно, исходный диаметр, содержание класса d_0 по фракциям, подача исходного материала, плотность руды, твердость, содержание металла в исходной руде; $\varphi, \psi, r, L_M, D_M$ - коэффициент заполнения, скорость вращения, число и типоразмер мельниц; d_g, γ - диаметр и объемная масса стальных шаров; $F(\bar{y})$ - зависимость, характеризующая состояние электромеханической системы мельница-двигатель [3]; T_{Si}, R_{Si} - твердость и класс крупности d продукта циркуляции; Q_{Si} - вес циркулирующего продукта i-й стадии измельчения; V_M - масса добавляемой в мельницу воды; R_M, T_M - содержание класса крупности d_M и твердость в мельнице; B_M, D_p, H_P, L_p - соответственно, плотность пульпы, диаметр, высота подачи, длина горизонтальной части трубопровода; B_K - плотность пульпы в классификаторе; T_K - твердость в классификаторе; g, L_K, D_K - число и типоразмер классификатора; V_K - масса добавляемой в классификатор воды.

Следует отметить, что на выходе сформированной модели образуется вектор $\{w, R, \beta\}$, характеризующий удельный расход

электроэнергии, массу расходуемой чистой воды, гранулометрический состав и содержание металла измельчаемого материала:

$$w = \frac{1}{Q_0}\left(\sum_{P=1}^{P1} \frac{Q_p H_p Z_{pq} t_{np}}{102\eta_P} + \sum_{r=1}^{m1} \frac{\left(1{,}8\sqrt{2D_r} L_r \psi_r + \gamma_{gr} V_r S_{0r} \sqrt{D_r}\right) t_{mr} + 3\sqrt{2D_r} L_r \psi_r}{\eta_{eax}\eta_D} + \right.$$
$$\left. + \sum_{h=1}^{m2} \frac{\left(1{,}8\sqrt{2D_h} L_h \psi_h + \gamma_{rh} V_h S_{0h} \sqrt{D_h}\right) t_{mh} + 3\sqrt{2D_h} L_h \psi_h}{\eta_{eax}\eta_D} + \sum_{g=1}^{g1} k_{3g} t_{kg} D_{kg} L_{kg} \right),$$

$$\beta = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \frac{1 - R_{ci}}{\left(\frac{Q_{Si}}{Q_0} + 1\right) - \left(\frac{Q_{Si}}{Q_0} + 1\right) R_{ki}}, \quad R = 1 - R_{kn}\left(\frac{Q_{Sn}}{Q_0} + 1\right) - R_{Sn}\frac{Q_{Sn}}{Q_0},$$

где Z_{pq} - плотность пульпы между операциями p и q; k_{3g} - коэффициент загрузки электродвигателя приводящего классификатора g; $t_{np}, t_{kg}, t_{mr}, t_{mh}$ - коэффициенты использования, соответственно, пульпонасоса, классификатора, мельниц первой и второй стадий; $\eta_{max}, \eta_D, \eta_k$ - соответственно, КПД передачи, электродвигателя и насоса; S_{or}, S_{oh} - безразмерный коэффициент полезной мощности мельниц первой и второй стадий; R_{ci} - содержание плюсового класса i-й стадии слива классификатора; R_{ki}, R_{kn} - содержание плюсового класса, соответственно, на входе классификатора i-й и n-й стадий измельчения; R_{Si}, R_{Sn} - содержание циркулирующего класса i - й и n - й стадий измельчения; Q_{Si}, Q_{Sn} - циркулирующие нагрузки i - й и n - й стадий измельчения; Q_P, H_P - производительность пульпонасоса и напор, развиваемый насосом.

Для уточнения циркулирующих параметров минимизируется отклонение циркулирующих параметров между итерациями i и i+1 (использован алгоритм Нелдера-Мида [4]):

$$\left(\frac{Q_{Si} - Q_{Si-1}}{Q_{Si}}\right)^2 + \left(\frac{T_{Si} - T_{Si-1}}{T_{Si}}\right)^2 + \left(\frac{R_{Si} - R_{Si-1}}{R_{Si}}\right)^2 \to \min.$$

Полученные результаты позволяют с высокой точностью исследовать энергетические затраты по операциям и сформулировать целевую функцию для оптимальных расходов электроэнергии.

Учитывая, что стратегия управления технологической линией измельчения основана на снижении удельного расхода электроэнергии, увеличении извлечения полезных компонентов из перерабатываемых руд, повышении и стабилизации содержания мелкого класса (-0,08), предъявляются более высокие требования к качеству оптимизации

расходов электроэнергии с учетом параметров, определяющих качественные характеристики режимов работы линии измельчения.

В данной статье предлагается подход к оптимизации потребляемой электроэнергии, основывающийся на учете нескольких важных, помимо электропотребления, критериев оптимизации, в частности, учитывается содержание мелкого класса в сливе R, содержание металла в продукте β, а также соотношение крупности слива классификаторов по содержанию плюсового класса между стадиями:

$$w(\bar{x}) \to \min, \quad R(\bar{x}) \to \max, \quad \beta(\bar{x}) \to \max,$$

$$D = \begin{Bmatrix} x \in S^n : R_0 > R_{K1} > R_{c1}; R_{ci-1} > R_{Ki} > R_{ci}; \\ x_j^- \le x_j \le x_j^+, \quad j = 1,2,...,n \end{Bmatrix},$$

где x_j^-, x_j^+ - нижнее и верхнее предельные значения для j-го управляемого параметра.

Учитывая конфликтность требований, предъявляемых к технологической линии измельчения, решается задача нахождения оптимального компромиссного набора технологических параметров.

Для этого применяется теория игры, предметом изучения которой является математический анализ формализованной модели конфликта, учитывающий особенности реальной конфликтной ситуации.

В качестве модели конфликта использована платежная матрица $\|a_{i\ell}\|$, которая аккумулирует в себе основные условия задачи оптимизации и представляет собой матрицу значений (потер), показывающую изменение рассматриваемых критериев оптимальности от экстремального во всех возможных наборах технологических параметров:

$$a_{i\ell} = \left| \frac{F_\ell(\bar{x}_k) - F_\ell(\bar{x}_i)}{F_\ell(\bar{x}_k)} \right|,$$

где ℓ - номер рассматриваемого критерия (ℓ = 1,2,3); i - номер набора технологических параметров (i=1,2,...,m); $F_\ell(\bar{x}_k)$ - экстремальное значение ℓ - го критерия; $F_\ell(\bar{x}_i)$ - значение ℓ - го критерия при i -ом наборе технологических параметров.

Таким образом, задача оптимизации сводится к игре с матрицей

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & ..... & m \end{array} \\ \begin{Vmatrix} a_{11} & a_{12} & ..... & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & ..... & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & ..... & a_{3m} \end{Vmatrix} \end{array}$$

Цели первого и второго игроков антагонистические. Игрок 2 стремится минимизировать изменение критериев, а игрок 1 -

максимизировать его. Определим оптимальный набор технологических параметров (вектор E), при котором были бы минимальными потери по всем критериям оптимальности (W, β, R):

$$E = \left\| C_1 \quad C_2 \quad C_3 \right\| \begin{Vmatrix} x_1^i & x_2^i & . & . & . & x_n^i \\ x_1^j & x_2^j & . & . & . & x_n^j \\ x_1^K & x_2^K & . & . & . & x_n^K \end{Vmatrix}, \qquad C_1 + C_2 + C_3 = 1,$$

где C_1, C_2, C_3 - оптимальные стратегии первого игрока; $x_1^i,...x_n^i; x_1^j,...x_n^j; x_1^K,...x_n^K$ - режим технологических параметров соответствующей оптимальной стратегии.

Стратегии первого игрока являются случайным набором критериев оптимизации $w(\bar{x})$, $R(\bar{x})$, $\beta(\bar{x})$, а стратегии второго игрока - набором технологических параметров. Решение представленной матричной игры осуществляется симплекс-методом линейного программирования. Для определения составляющих вектора E прежде всего решается следующая экстремальная задача:

Найти

$$YV \to \max, \qquad Y = \eta_1, \eta_2, \eta_3, ..., \eta_m \tag{1}$$

при условии

$$AY \le U, \tag{2}$$

где V= {1,1,...,1} , U={1,1,...,1}.

Введением дополнительных неотрицательных переменных неравенство (2) превратим в равенство

$$\eta_1 a_1 + \eta_2 a_2 + \ldots + \eta_m a_m + u_1\lambda_1 + u_2\lambda_2 + u_3\lambda_3 = 1,$$

а максимизирующую функцию (1) представим в виде

$$\eta_1 + \eta_2 + \ldots + \eta_m + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 + 0 \cdot u_3 \to \max ,$$

где $a_1 = (a_{11}, a_{21}, a_{31})$, $a_2 = (a_{12}, a_{22}, a_{32})$, ..., $a_m = (a_{1m}, a_{2m}, a_{3m})$.

Выбирая в качестве начального базиса систему ортов u_1, u_2, u_3 и подсчитав строку симплекса [5] , получим исходную матрицу для рассматриваемой игры. Далее определяется базис и выполняется операция замещения. Выбор базиса и операция замещения повторяются до тех пор, пока в последней строке матрицы не исчезнут отрицательные элементы. Из окончательной таблицы находятся оптимальный вектор $Y = \eta_1, \eta_2, \eta_3, ..., \eta_m$ и значение игры μ, определяющей оптимальные стратегии C:

$$C = \left(\frac{\eta_1}{\mu}, \frac{\eta_2}{\mu}, \frac{\eta_3}{\mu}, ..., \frac{\eta_m}{\mu} \right).$$

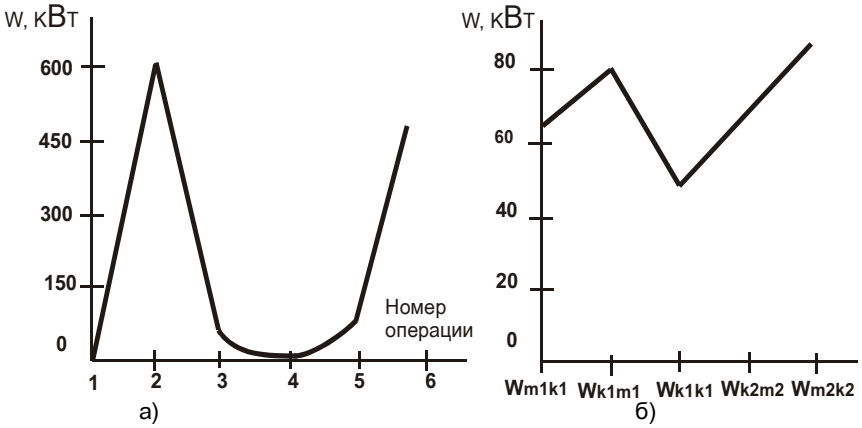

Рис.2. Расход электроэнергии по операциям (а), между операциями (б) для двухстадийной схемы измельчения

На основе описанного алгоритма разработан пакет программ, содержащий ряд диалоговых программ для анализа, прогноза и оптимизации технологических режимов и расходов электроэнергии промышленного процесса измельчения. Диалоговый сервис рассчитан на пользователей, не имеющих специальной подготовки программиста. Обслуживающие модули программы выполняют следующие функции: выбор схем измельчения и типоразмеров используемых аппаратов; ввод в диалоговом режиме исходных данных, таблиц начальных приближений; уточнение циркулирующих параметров; ввод нижней и верхней границ управляемых технологических параметров; вывод оптимальных режимов и результатов анализа в виде таблиц и графических изображений. Заполнение базы данных, расчеты и формирование выходных графиков (рис.2) осуществляются с помощью предоставленных пользователю соответствующих “меню”. Пакет программ работает в операционных системах Windows-95, Windows-98, Windows-2000.

Разработанный алгоритм позволяет при разных технологических и организационных ситуациях оперативно выяснить изменение качество-количественных показателей выходного продукта и расходов электроэнергии по операциям, а также оптимизировать их с учетом важных критериев оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kheifets A.S., Lin I.J**.Energetigc approach to kinetics of batch ball milling // Jnt. J. Miner. Process.-1998.-54, ¹ 2. – P. 81-97.
2. **Папков Б.В, Шеголькова Т.М**. Повышение эффективности электропотребления на промышленных предприятиях // Промышленная энергетика. - 1995. - ¹ 12. - С 21.
3. **Багдасарян М.К., Меликян Д.Р**. Модель для оценки динамики электромеханической системы мельница-двигатель // Информационные технологии и управление. – Ереван, 2000. -¹ 4. – С. 56-62.

4. **Банди Б.** Методы оптимизации: Пер. с англ.- М.: Радио и связь, 1988. - 128 с.
5. **Крапивин В.Р.** Теоретико-игровые методы синтеза сложных систем в конфликтных ситуациях. - М.: Наука, 1982. – 213 с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 17.03.2001.

Մ. Ք. ԲԱՂԴԱՍԱՐՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԾԱԽՄԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄԸ ԼԵՌՆԱՀԱՐՍՏԱՑՄԱՆ ՁԵՌՆԱՐԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՆՐԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԳԾԵՐՈՒՄ

Դիտարկված են մանրացման տեխնոլոգիական գծերում ծախսվող էլեկտրաէներգիայի վերլուծության և լավարկման խնդիրները տարբեր տեխնոլոգիական իրավիճակներում: Առաջարկված են մաթեմատիկական մոդել, լուծման ալգորիթմ և ծրագրային փաթեթ:

M.K. BAGHDASSARYAN

ELECTRIC POWER CONSUMPTION ANALYSIS AND OPTIMIZATION IN TECHNOLOGICAL REDUCING LINE ON MINING CONCENTRATING PLANT

An electric power consumption analysis and optimization problem in technological reducing line under different technological situations is considered. A mathematical model, algorithm of solution and software package are proposed.