

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**О. Н. Синчук, А. И. Купин, И. О. Синчук, И. А. Козакевич, О. В. Дозоренко**

Криворожский национальный университет

ул. Виталия Матусевича, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: speet@ukr.net

В работе показана актуальность разработки научных подходов для оптимизации энергетических потоков в условиях подземной добычи железной руды. Обосновано систему критериев оптимизации, определены целевые функции, основные информационные параметры и ограничения. Рассмотрены возможности использования различных подходов для оптимизации процесса потребления электрической энергии на основе минимаксных функционалов, использования системы ограничений, вычисления рациональных уставок. Предложены соответствующие методические и алгоритмические решения поставленных задач с использованием нескольких стратегий. Разработаны способы оптимизации целевых параметров. Предложены принципы реализации указанных алгоритмов на основе использования нечеткой логики (Fuzzy Logic). Приведены базовые принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода для различного количества параметров оптимизации. Определены множества лингвистических переменных (термов) для всех нечетких параметров с учетом трехзонного тарифа. Обусловлены принципы формирования базы нечетких правил для возможности автоматизации вычислений, где в качестве базового алгоритма процедуры дефазификации использован алгоритм Мамдани. Разработана методика определения оптимальных уставок в случае использования основного критерия маргинального типа при ограничениях на основные параметры и/или наличия ограничений с учетом полученной функциональной зависимости и трехзонного тарифа на электроэнергию, а также синтезированы соответствующие оптимальные уставки. Логика получения таких уставок основывается на применении минимаксного подхода в условиях типичной железорудной шахты. Осуществлено моделирование работы нечеткой оптимизации в среде программного пакета MatLab. Получены основные аналитические показатели, которые однозначно подтверждают достаточное качество и эффективность применения полученных решений. Предложены структурные схемы и средства для практической реализации таких систем в промышленных условиях. Расчетным путем подтверждено, что применение данных подходов позволит реализовать автоматизированный поиск экстремальных значений целевой функции энергопотребления в условиях реального времени и оптимизировать затраты на потребленную электрическую энергию. Доказана работоспособность подхода в условиях однопараметрической и многопараметрической оптимизации.

Ключевые слова: энергопотребление, Fuzzy Logic, критерии оптимизации.**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ****О. М. Сінчук, А. І. Купін, І. О. Сінчук, І. А. Козакевич, О. В. Дозоренко**

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: speet@ukr.net

В роботі показано актуальність розробки наукових підходів для оптимізації енергетичних потоків в умовах підземного видобутку залізної руди. Обґрунтовано систему критеріїв оптимізації, визначені цільові функції, основні інформаційні параметри і обмеження. Розглянуто можливості використання різних підходів для оптимізації процесу споживання електричної енергії на основі мінімакських функціоналів, використанні системи обмежень, обчислення раціональних уставок. Запропоновано відповідні методичні та алгоритмічні рішення поставлених завдань з використанням декількох стратегій. Розроблено способи оптимізації цільових параметрів. Запропоновано принципи реалізації зазначених алгоритмів на основі використання нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Наведено базові принципи фазифікації та формування бази логічних правил виведення для різної кількості параметрів оптимізації. Визначено безлічі лінгвістичних змінних (термів) для всіх нечітких параметрів з урахуванням трьохзонного тарифу. Обумовлені принципи формування бази нечітких правил для можливості автоматизації обчислень, де в якості базового алгоритму процедури дефазифікації використано алгоритм Мамдани. Розроблено методику визначення оптимальних уставок в разі використання основного критерію маргінального типу при обмеженнях на основні параметри і/або наявності обмежень з урахуванням отриманої функціональної залежності та трьохзонного тарифу на електроенергію, а також синтезовані відповідні оптимальні уставки. Логіка отримання таких уставок ґрунтується на застосуванні мінімаксного підходу в умовах типової залізорудної шахти. Здійснено моделювання роботи нечіткої оптимізації в середовищі програмного пакету MatLab. Отримано основні аналітичні показники, які однозначно підтверджують достатню якість і ефективність застосування отриманих рішень. Запропоновано структурні схеми та засоби для практичної реалізації таких систем в промислових умовах. Розрахунковим шляхом доведено, що застосування даних підходів дозволить реалізувати автоматизований пошук екстремальних значень цільової функції енергоспоживання в умовах реального часу і оптимізувати витрати на спожиту електричну енергію. Доведено працездатність підходу в умовах однопараметричної і багатопараметричної оптимізації.

Ключові слова: енергоспоживання, Fuzzy Logic, критерії оптимізації.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время, в условиях работы отечественных электрогенерирующих предприятий (облэнерго), которые стимулируют потребителей максимально выравнивать объемы суточного «производство-потребление» электроэнергии. Ценовая политика генерирующих предприятий, относительно потребителей электроэнергии, соответствует временным промежуткам образующих, в часах суток, зонные тарифы потребления электроэнергии: «Пик», «ПолуПик», «Ночь». В себестоимости добычи железорудного сырья 30 % составляют энергозатраты, где в свою очередь, более 90 % составляют электроэнергозатраты. Таким образом, при функционировании железорудных шахт Украины достаточно актуальной является проблема оптимизации энергопотребления (расхода электроэнергии, соответствующие затраты) при использовании многозонного тарифа («Ночь/ПолуПик/Пик»). Рассматриваемый технологический процесс является сложным многопараметрическим, нелинейным и многосвязным [1–3]. Предварительный анализ и проведенные авторами аналитические расчеты показывают, что в условиях функционирования железорудных шахт использование методического подхода оптимизации процесса потребления электрической энергии на основе рационального суточного перераспределения основных материальных ресурсов подземного производства (руда, вода, воздух) позволяет увеличить суточную добычу руды до 20–28 % при сохранении плановых показателей производства сырья. Поэтому разработка указанных оптимизационных подходов является достаточно актуальной в современных условиях.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Как известно основными потребителями электроэнергии (ЭЭ) на шахтах являются передель добычи/транспортировки рудной массы, отведение шахтных вод (водоотлив), подача воздуха и вентиляция [4]. С учетом этого следует определить потенциально возможные критерии оптимизации (1)–(5):

$$Z^e = F(RE, HT) \Rightarrow \min; \quad (1)$$

$$P \Rightarrow \max; \quad (2)$$

$$B \Rightarrow \max; \quad (3)$$

$$B_o \Rightarrow \max; \quad (4)$$

$$B_m \Rightarrow \max, \quad (5)$$

где Z^e – общие затраты предприятия за потребленную электроэнергию (почасово, посуточно), грн; RE – расход электроэнергии (почасово, посуточно), кВт; HT – действующий тариф на электроэнергию, грн/кВт; $F(\bullet)$ – некоторая установленная функциональная зависимость; P – выработка рудной массы на предприятии (почасово, посуточно), т; B – подача воздуха (почасово, посуточно), m^3 ; B_o – объем откачки шахтных вод (почасово, посуточно), m^3 ; B_m – вентиляция (почасово, посуточно), m^3 .

Учитывая потенциальную сложность решения подобных многокритериальных задач некоторые из

вышеприведенных минимаксных критериев предлагается в перспективе заменить ограничениями типа:

$$P \geq P^{\min}; \quad (6)$$

$$B \geq B^{\min}; \quad (7)$$

$$B_o \geq B_o^{\min}; \quad (8)$$

$$B_m \geq B_m^{\min}, \quad (9)$$

где P^{\min} , B^{\min} , B_o^{\min} , B_m^{\min} – некоторые граничные значения соответствующих параметров (например, суточные плановые значения).

Значение расхода электроэнергии в системе в целом либо в отдельных пределах из локального критерия целевой функции (1) таким образом можно переопределить в виде:

$$RE = f(P, B, B_o, B_m), \quad (10)$$

где $f(\bullet)$ – некоторая функция либо аппроксимация.

Сейчас достаточно активно развивается альтернативный способ оптимизации ТП на основе использования технологий искусственного интеллекта (нечеткая логика, нейронные сети, экспертные системы и т.д.). В отличие от "классических" детерминированных подходов, которые основаны на использовании жестких алгоритмов (или четкой логики), системы с использованием искусственного интеллекта имеют свойства обучения, накопления и обобщения опыта. Причем таком обобщению могут подлежать факторы, которые плохо формализуются с использованием обычных математических методов (например, собственный опыт или интуиция специалистов и др.). Опыт показывает, что на разработку и внедрение подобных интеллектуальных систем тратится значительно меньше средств за счет уменьшения необходимости использования дорогостоящего оборудования (датчики, средства телекоммуникации и т.д.). Именно интеллектуальные системы за счет применения отдельных математических моделей умственной деятельности человека, обобщающих свойств, встроенной нелинейности и адаптивности при обеспечении определенных условиях позволяют решать такие задачи в условиях нечеткой и/или неполной информации [6–8]. С учетом возможного наличия информационной неопределенности в реальных производственных условиях одним из наиболее перспективных подходов для рассматриваемой задачи является оптимизация на основе применения нечеткой логики (Fuzzy Logic) [7, 9]. Для этого рассмотрим далее принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода. Определим, согласно методике описанной в [5] формализуем базовое нечеткое множество для нашей системы. В нашем случае это множество будет состоять из трех элементов ($N=3$):

$$\bar{B} = \bigcup_{i=1}^N \left\{ \frac{\beta_i}{\mu(\beta_i)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_1}{\mu(\beta_1)}; \frac{\beta_2}{\mu(\beta_2)}; \frac{\beta_3}{\mu(\beta_3)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_{RE}}{\mu(\beta_{RE})}; \frac{\beta_{HT}}{\mu(\beta_{HT})}; \frac{\beta_P}{\mu(\beta_P)} \right\}, \quad (11)$$

где \bar{B} – базовое нечеткое множество; β_i – нечеткое значение определенного параметра (например, управляющего или управляемого); $\beta_1 = \beta_{RE}$ – соответствующее нечеткое значение для параметра энергопотребления; $\beta_2 = \beta_{HT}$ – нечеткое значение для тарифа; $\beta_3 = \beta_P$ – нечеткое значение рудопотока; $\mu(\beta_i)$, $\mu(\beta_1)$, $\mu(\beta_2)$, $\mu(\beta_3)$, $\mu(\beta_{RE})$, $\mu(\beta_{HT})$, $\mu(\beta_P)$ – значение функций принадлежности для соответствующих параметров.

Определяем множества лингвистических переменных (термов) для всех вышеприведенных нечетких параметров:

$$T_1^{\text{ЭЭ}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{MIN}{NB}; \frac{\text{менее_среднего}}{NS}; \\ \frac{\text{среднее}}{Z}; \frac{\text{более_среднего}}{PS}; \frac{MAX}{PB} \end{array} \right\}; \quad (12)$$

$$T_2^{\text{Тариф}} = \left\{ \frac{\text{Ночь}}{NS}; \frac{\text{ПолуПик}}{Z}; \frac{\text{Пик}}{PS} \right\}; \quad (13)$$

$$T_3^{\text{Руда}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{MIN}{NB}; \frac{\text{менее_среднего}}{NS}; \\ \frac{\text{среднее}}{Z}; \frac{\text{более_среднего}}{PS}; \frac{MAX}{PB} \end{array} \right\}, \quad (14)$$

где $T_1^{\text{ЭЭ}}$, $T_2^{\text{Тариф}}$, $T_3^{\text{Руда}}$ – идентификаторы множественных термов для нечетких переменных: расхода электроэнергии (ЭЭ), тарифообразования и рудопотока; $\{MIN, \text{менее_среднего}, \text{среднее}, \text{более_среднего}, MAX\} + \{\text{Ночь}, \text{ПолуПик}, \text{Пик}\}$, $\{NB, NS, Z, PS, PB\} + \{NS, Z, PS\}$ – полные или сокращенные идентификаторы для обозначения соответствующих значений данных термов.

Рассмотрим далее принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода в условиях двухпараметрической оптимизации. Данный тип оптимизации реализуется двумя из возможных параметрических воздействий из (11). Это стратегии типа «Руда/Водоотлив» или «Руда/Вентиляция» и т.д. Общие принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода для двухканальной оптимизации на примере стратегии типа («Руда+Водоотлив»). Другие такие стратегии будут реализовываться аналогично. Регулирующими воздействиями тут является: рудопоток P и объем откачки воды B_o , регулируемым параметром будет значение расхода электроэнергии из (10). Параметры подачи воздуха и вентиляции относим к возмущающим ограничениям.

Расширим базовое нечеткое множество (11) для возможности реализации двухканальной оптимизации. В нашем случае это множество теперь будет включать 4 элемента ($N=4$):

$$\bar{B} = \bigcup_{i=1}^N \left\{ \frac{\beta_i}{\mu(\beta_i)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_1}{\mu(\beta_1)}; \frac{\beta_2}{\mu(\beta_2)}; \frac{\beta_3}{\mu(\beta_3)}; \frac{\beta_4}{\mu(\beta_4)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_{RE}}{\mu(\beta_{RE})}; \frac{\beta_{HT}}{\mu(\beta_{HT})}; \frac{\beta_P}{\mu(\beta_P)}; \frac{\beta_{B_o}}{\mu(\beta_{B_o})} \right\}, \quad (15)$$

где $\beta_4 = \beta_{B_o}$ – нечеткое значение для водоотлива; $\mu(\beta_4)$, $\mu(\beta_{B_o})$ – соответствующее значение функции принадлежности.

Тогда к множествам уже определенных выше термов (13)–(15) нужно дополнительно определить терм:

$$T_4^{\text{Вода}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{MIN}{NB}; \frac{\text{менее_среднего}}{NS}; \\ \frac{\text{среднее}}{Z}; \frac{\text{более_среднего}}{PS}; \frac{MAX}{PB} \end{array} \right\}, \quad (16)$$

где $T_4^{\text{Вода}}$ – идентификатор терма для нечеткой переменной – объем откачки воды.

Аналогично получаем принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода в условиях трехканальной оптимизации. Данный тип оптимизации реализуется тремя параметрическими воздействиями из (11). В соответствии с алгоритмом это стратегия типа («Руда+Водоотлив+Вентиляция»). Параметрическими воздействиями тут является: рудопоток P и объем откачки воды B_o и вентиляции B_m , регулируемым параметром будет значение расхода электроэнергии из (10). Параметр подачи воздуха остается возмущающим. Общие принципы фазификации и формирования базы логических правил вывода для трехканальной оптимизации следующие.

Базовое нечеткое множество (15) для возможности реализации трехканальной оптимизации. В нашем случае это множество теперь будет включать 5 элементов ($N=5$):

$$\bar{B} = \bigcup_{i=1}^N \left\{ \frac{\beta_i}{\mu(\beta_i)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_1}{\mu(\beta_1)}; \frac{\beta_2}{\mu(\beta_2)}; \frac{\beta_3}{\mu(\beta_3)}; \frac{\beta_4}{\mu(\beta_4)}; \frac{\beta_5}{\mu(\beta_5)} \right\} = \left\{ \frac{\beta_{RE}}{\mu(\beta_{RE})}; \frac{\beta_{HT}}{\mu(\beta_{HT})}; \frac{\beta_P}{\mu(\beta_P)}; \frac{\beta_{B_o}}{\mu(\beta_{B_o})}; \frac{\beta_{B_m}}{\mu(\beta_{B_m})} \right\}, \quad (17)$$

где $\beta_5 = \beta_{B_m}$ – нечеткое значение для водоотлива; $\mu(\beta_5)$, $\mu(\beta_{B_m})$ – соответствующее значение функции принадлежности.

Тогда к множествам уже определенных выше термов (12)–(16) нужно дополнительно определить терм

$$T_5^{\text{Вентиляция}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{MIN}{NB}; \frac{\text{менее_среднего}}{NS}; \\ \frac{\text{среднее}}{Z}; \frac{\text{более_среднего}}{PS}; \\ \frac{MAX}{PB} \end{array} \right\}, \quad (18)$$

где $T_5^{\text{Вентиляция}}$ – идентификатор терма для нечеткой переменной – объем вентиляции воздуха в шахте.

В случае использования маргинального критерия типа (1) при ограничениях на основные регулирующие воздействия и/или возмущения типа (6)–(9) с учетом функциональной зависимости (10) и трехзонного тарифа на электроэнергию

(«Пик/ПолуПик/Ночь») имеет смысл синтезировать соответствующие оптимальные уставки. Логика получения таких уставок основывается на применении минимаксного подхода для оптимизации энергетических и вещественных потоков в условиях шахты, а именно:

- при максимальном (пиковом) значении тарифа (т.е. $\beta_2 = PS$) желателен установить минимальное энергопотребление за счет минимизации вещественных потоков (руды, воды, воздуха и т.д.);
- при минимальном (ночном) значении тарифа ($\beta_2 = NS$) можно допустить максимальное энергопотребление за счет максимальных вещественных потоков;
- при промежуточном (полупиковом) значении тарифа ($\beta_2 = Z$) применяем балансирующее энергопотребление за счет соответствующих объемов вещественных потоков.

Используя данную логику формализуем такие уставки по каждому возможному каналу оптимизации. Так для рудопотока имеем:

$$P_{i=1..T^\Delta}^* = \begin{cases} \text{Max} [P_i^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = NS); \\ \text{Min} [P_i^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = PS); \\ K^* (\text{Max} [P_i^{cym}] + \text{Min} [P_i^{cym}]) / 2, & \text{if } (\beta_2 = Z), \end{cases} \quad (19)$$

где P_i^* – значение уставки (задание) по добыче руды на i -м шаге оптимизации ($i = 1..T^\Delta$); T^Δ – количество дискретных периодов измерений параметра (руды) в сутки (например, если принимаем периодичность дискретности измерения параметра $\Delta t = 30$ мин. = 0,5 часа, тогда $T^\Delta = 48$ измерений по руде в сутки); $\text{Max} [P_i^{cym}]$, $\text{Min} [P_i^{cym}]$ – соответственно максимум/минимум из возможных дискретных значений показателя шахтной добычи руды в сутках (из всей выборки измерений); K^* – некоторый корректирующий коэффициент.

Конкретное значение последнего можно определить из балансирующего суточного уравнения с учетом того, что суточная добыча руды должна быть на уровне некоторого планового значения $P_{план}^{cym}$. Тогда:

$$T^{\max} \text{Max} [P_i^{cym}] + T^{\min} \text{Min} [P_i^{cym}] + \tilde{T} K^* (\text{Max} [P_i^{cym}] + \text{Min} [P_i^{cym}]) / 2 = P_{план}^{cym}, \quad (20)$$

где T^{\max} – количество максимальных дискретных периодов с соответствующей добычей руды (т.е. при «ночном» тарифе); T^{\min} – количество минимальных периодов с соответствующей добычей руды (пиковый тариф); \tilde{T} – количество дискретных балансирующих периодов с промежуточным (корректиру-

ющим) уровнем добычи (полупиковый тариф); $T^{\max} + T^{\min} + \tilde{T} = T^\Delta$; $i = 1..T^\Delta$.

Тогда при $T^\Delta = 48$, дискретности измерения технологических параметров $\Delta t = 30$ мин. (0,5 часа) получаем для шкалы текущего 3-х зонного тарифа на потребляемую электроэнергию для промпредприятий: $T^{\max} = 13$; $T^{\min} = 14$; $\tilde{T} = 21$. Подставляя эти данные в (21) получаем:

$$13 \cdot \text{Max} [P_i^{cym}] + 14 \cdot \text{Min} [P_i^{cym}] + 21 \cdot K^* (\text{Max} [P_i^{cym}] + \text{Min} [P_i^{cym}]) / 2 = P_{план}^{cym}. \quad (21)$$

Откуда:

$$K^* = \frac{P_{план}^{cym} - (13 \cdot \text{Max} [P_i^{cym}] + 14 \cdot \text{Min} [P_i^{cym}])}{10,5 (\text{Max} [P_i^{cym}] + \text{Min} [P_i^{cym}])}. \quad (22)$$

Используя идентичные преобразования, были получены аналогичные уставки типа (19)–(22) для других каналов оптимизации (вода, воздух и т.д.).

$$B_{i=1..T^\Delta}^* = \begin{cases} \text{Max} [B_{oi}^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = NS); \\ \text{Min} [B_{oi}^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = PS); \\ K^{**} (\text{Max} [B_{oi}^{cym}] + \text{Min} [B_{oi}^{cym}]) / 2, & \text{if } (\beta_2 = Z), \end{cases} \quad (23)$$

где B_{oi}^* – значение задание (уставки) по объему откачки шахтной воды на i -м шаге оптимизации ($i = 1..T^\Delta$); $\text{Max} [B_{oi}^{cym}]$, $\text{Min} [B_{oi}^{cym}]$ – соответственно максимум/минимум из возможных дискретных значений показателя шахтной откачки воды в сутках (из всей выборки измерений); K^{**} – некоторый корректирующий коэффициент.

При этом:

$$K^{**} = \frac{B_{план}^{cym} - (13 \cdot \text{Max} [B_{oi}^{cym}] + 14 \cdot \text{Min} [B_{oi}^{cym}])}{10,5 (\text{Max} [B_{oi}^{cym}] + \text{Min} [B_{oi}^{cym}])}. \quad (24)$$

где $B_{план}^{cym}$ – план суточного объема откачки шахтных вод.

Аналогично для показателя вентиляции

$$B_{mi}^* = \begin{cases} \text{Max} [B_{mi}^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = NS); \\ \text{Min} [B_{mi}^{cym}], & \text{if } (\beta_2 = PS); \\ K^{***} (\text{Max} [B_{mi}^{cym}] + \text{Min} [B_{mi}^{cym}]) / 2, & \text{if } (\beta_2 = Z), \end{cases} \quad (25)$$

где B_{mi}^* – уставка по объему вентиляции воздуха в шахте на i -м шаге оптимизации ($i = 1..T^\Delta$); $\text{Max} [B_{mi}^{cym}]$, $\text{Min} [B_{mi}^{cym}]$ – соответственно максимум/минимум из возможных дискретных значений показателя шахтной вентиляции в сутках (из всей

выборки измерений); K^{***} – некоторый корректирующий коэффициент.

При этом:

$$K^{***} = \frac{\tilde{B}_{план}^{сум} - (13 \cdot \text{Max} [B_{mi}^{сум}] + 14 \cdot \text{Min} [B_{mi}^{сум}])}{10,5 (\text{Max} [B_{mi}^{сум}] + \text{Min} [B_{mi}^{сум}])}, \quad (26)$$

где $\tilde{B}_{план}^{сум}$ – план суточного объема вентиляции воздуха в шахте.

Как видно из множеств (12)–(14) для последующей работы параметрами энергопотребления и рудопотока принимается пятизначная шкала, а для переменной тарифа – трехзначная. Пример параметризации с помощью среды пакета MATLAB. На рис. 1 показан пример такой параметризации на основе данных статистики по шахте «Родина» (г. Кривой Рог, Украина).

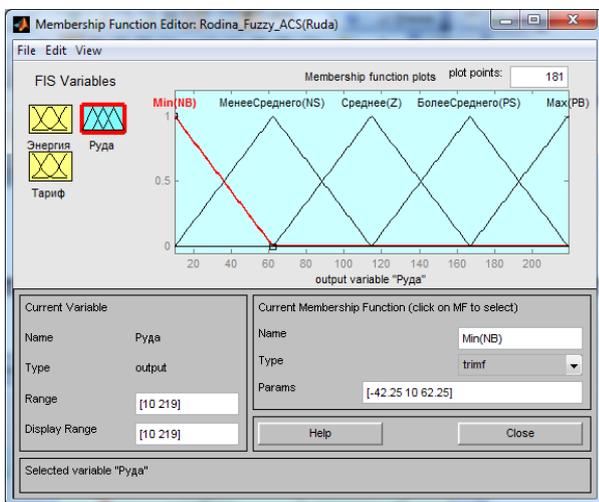


Рисунок 1 – Пример фазификации на основе данных статистики по шахте «Родина» по параметрам энергопотребления, тарифу (3-х зонный тариф) и выработки руды

Следующим этапом работы является определение базы данных с правилами для логического вывода. С учетом того, что в последующем для дефазификации планируется использовать алгоритм Мамдани [6–7], а также предварительно определенных нами нечетких множеств (12) и соответствующих термов (13)–(15) правила нечеткого вывода будем формировать в виде:

1) IF (Если) «Потребление ЭлектроЭнергии» (β_1) = «MIN» (NB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Пик» (PS) THEN (то) «Рудопоток» = «MIN» (NB);

2) IF (Если) «Потребление ЭлектроЭнергии» (β_1) = «Среднее» (Z) AND (И) «Тариф» (β_2) = «ПолуПик» (Z) THEN (то) «Рудопоток» = «Среднее» (Z);

3) IF (Если) «Потребление ЭлектроЭнергии» (β_1) = «MAX» (PB) AND (И) «Тариф» (β_2) = «Ночь» (NS) THEN (то) «Рудопоток» = «MAX» (PB).

...

Полная база таких правил приведена на рис. 2.

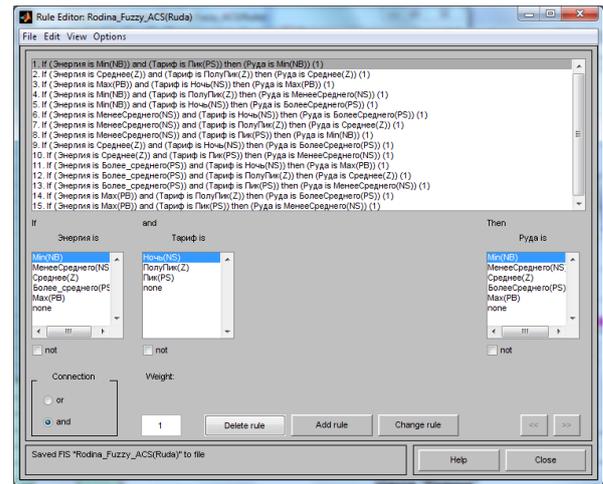


Рисунок 2 – Формирование базы правил (15) для принятия решений

Далее для моделирования оптимизации шахтного энергопотребления будем использовать среду модуль Fuzzy Logic Toolbox (FLT) из достаточно известного программного математического пакета прикладных программ MATLAB. Для этого воспользуемся стандартной методикой нечеткого моделирования, описанной в [8].

Оптимизацию осуществим на примере канала «Рудопоток->Энергопотребление» на основе статистики данных, полученных по шахте «Родина» (г. Кривой Рог, Украина). С учетом определенных выше нечетких переменных, нечетких множеств (11)–(14) и функций принадлежности (рис. 1) в редакторе FIS задаются входные и выходные параметры (рис. 3).

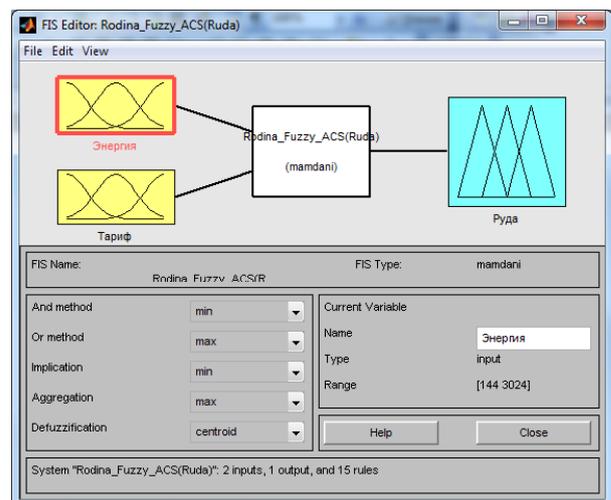


Рисунок 3 – Создание и определение параметров оптимизации в редакторе FIS

В процессе фазификации были определены соответствующие максимальные и минимальные суточные параметры:

- расход электроэнергии (144; 3024) кВт/сутки;
- добыча руды (10; 219) т/сутки.

На основе таких данных была получена 3d-модель поверхности для нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели (рис. 4).

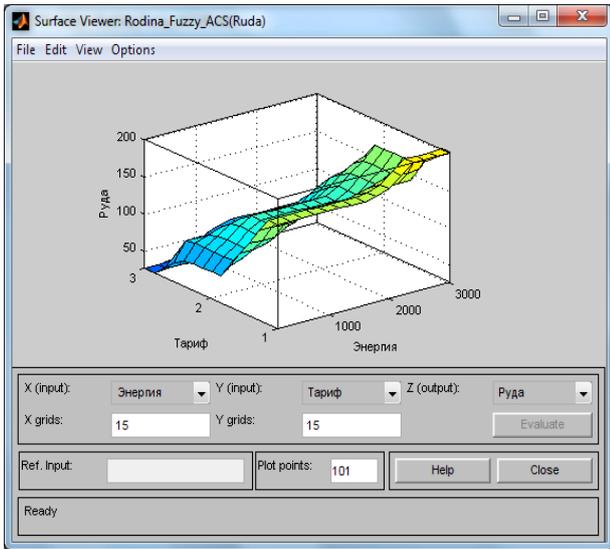


Рисунок 4 – 3d-модель поверхности для нечеткого вывода для нечеткой модели (по данным шахты «Родина», г. Кривой Рог, Украина)

С использованием соответствующего режима MATLAB FLT для моделирования процедур нечеткого вывода осуществляем проверку работы методики, а затем осуществляем расчет необходимых параметров (рис. 5). При этом используются различные значения трехзонного тарифа на потребляемую электроэнергию. В качестве базовых тарифов были взяты текущие данные по компании «ДТЭК Днепроблэнерго» (для промышленных потребителей 1-й категории) [10].

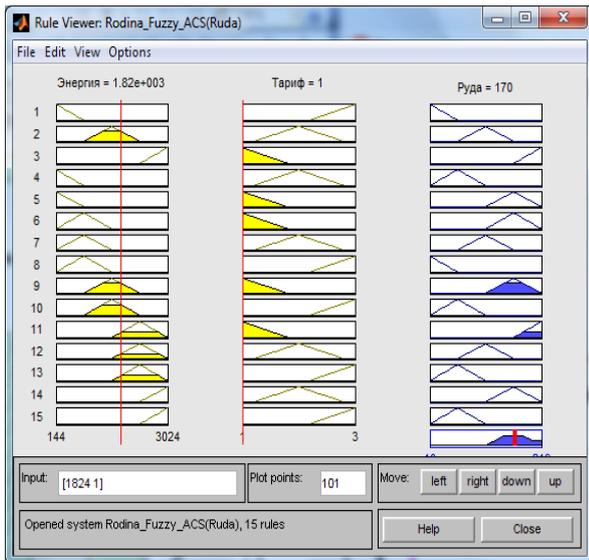


Рисунок 5 – Процедура нечеткого вывода: при тарифе «Ночь» (Тариф=1)

На рис. 6 показаны результаты моделирования работы нечеткой оптимизации энергопотребления на основе изменения параметра – суточной добычи руды, распределенной во времени. Дискретность моделирования регулятора составила 30 мин.



Рисунок 6 – Зависимости потребляемой мощности активной электроэнергии (1) до и после оптимизации (уставка 1*), а также прогноза энергопотребления при условии критерия (1)



Рисунок 7 – Моделирование минимаксного подхода к оптимизации по каналу «Воздух» («Вентиляция воздуха»)



Рисунок 8 – Результаты трехканальной («Руда-Вода-Воздух») оптимизации суммарного потреблением ЭЭ на основе рациональной уставки («Уставка123*»)

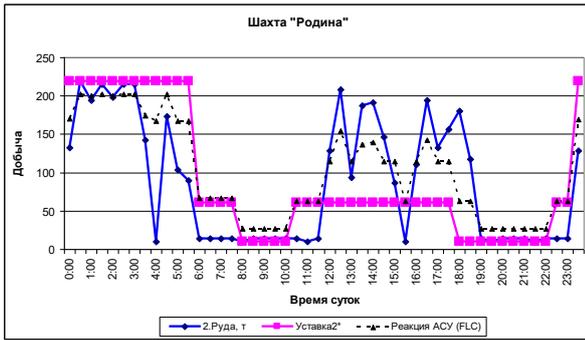


Рисунок 9 – Зависимости по рудопотоку на шахте как регулируемому параметру, отработки и прогноза добычи при условии максимизации последней

ВЫВОДЫ. На основе применения методологии нечеткой логики проведены исследования энергопотребления типичной железорудной шахты, включающих в себя этапы фазификации, логического вывода и дефазификации, которые выгодно отличаются от существующих тем, что количество управляющих воздействий является переменным и определяется на основе наличия корреляционной связи между управляющими и управляемыми параметрами основных технологических переделов и выбранных критериев функционирования системы. Указанное позволяет реализовать автоматизацию принятия решений в реальных производственных условиях: неполной информации; нелинейных характеристик; многоканальности.

Анализ результатов моделирования и проведенных аналитических расчетов показывает, что в условиях функционирования шахты «Родина» использование методического подхода оптимизации процесса потребления электрической энергии на основе минимаксных функционалов позволяет увеличить суточную добычу руды на 14,85 % (то есть более 600 т / сут.). При этом суточное потребление электроэнергии аналогично вырастет на 14,86 % (с учетом высокого коэффициента корреляции около 0,9), а затраты на использование электроэнергии с учетом трехзонного тарифа вырастут на 10,83 % (это 8 тыс.грн). Однако при текущей стоимости товарной железной руды на мировом рынке порядка 110 \$/т это может компенсироваться потенциальным доходом порядка $= 600 \cdot 110 \cdot 27 = 1782000$ грн/сут. (при курсе 27 грн за 1 \$ США).

Установлено, что использование минимаксной стратегии во всех случаях приводит к увеличению суточной добычи руды и расходов электроэнергии на 15–50 % и соответствующих расходов на 11–75 %. В то же время расходы показали, что по-

тенциальный доход от реализации дополнительного объема железорудного сырья полностью компенсирует указанные расходы. Применение управления на основе оптимальных установок всегда приводит к уменьшению затрат на потребленную электроэнергию (за счет оптимального перераспределения в условиях 3-х зонного тарифа) до 20–28 % при сохранении плановых показателей производства руды.

При верификации результатов компьютерного моделирования использовалась реальная статистика работы железорудных шахт Кривбасса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мееров М. В. и др. Многосвязные системы управления : под ред. М. В. Меерова. Москва : Наука, 1990. 264 с.
2. Денисов А. А., Колесников Д. Н. Теория больших систем управления. Ленинград : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 287 с.
3. Молчанов А. А. Моделирование и проектирование сложных систем : науч. пособ. Киев : Вища школа, 1988. 359 с.
4. Сінчук І. О. Формалізація показників балансу споживання електричної енергії підземними залізрудними підприємствами. *Наук.-техн. зб. Гірничий вісник КНУ*. 2019. № 105. С. 132–138.
5. Купін А. І., Сенько А. О., Мисько Б. С. Ідентифікація та автоматизоване керування в умовах процесів збагачувальної технології на основі методів обчислювального інтелекту : монографія. Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д. О., 2018. 298 с.
6. Леонинков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт Петербург : БХВ-С.Петербург, 2003. 736 с.
7. Бодяньський Є. В., Кученренко Є. І., Михальов О. І., Філатов В. О. Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва : монографія. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2011. 420 с.
8. Kupin A., Senko A. Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes. *CEUR Workshop Proceedings*. 2015. № 1356. P. 153–160.
9. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. 832 с.
10. Тарифи на електроенергію (для побутових клієнтів). URL: <https://dnep.com.ua/tariffs-home-clients/>

OPTIMIZATION OF POWER CONSUMPTION IN CONDITIONS OF IRON ORE MINE ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC APPLICATION

O. Sinchuk, A. Kupin, I. Sinchuk, I. Kozakevych, O. Dozorenko

Kryvyi Rih National University

vul. Vitalia Matusevicha, 11, 50027, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

Purpose. Development of practical and methodological optimization approaches for the process of electric energy consumption based on rational daily redistribution of the main material resources of underground production (ore,

water, air) to implement decision-making automation in real production conditions: incomplete information; nonlinear characteristics; multichannel conditions in the functioning of iron ore mines. **Methodology.** Studies based on the application of the methodology of fuzzy logic regarding the energy consumption of a typical iron ore mine, including the stages of phaseization, inference and dephasing. **Results.** An analysis of the simulation results and the analytical calculations performed shows that, in a typical iron ore mine, the use of a methodological approach to optimizing the process of electric energy consumption based on minimax functionals allows to increase daily ore production. When verifying the results of computer simulation, we used real statistics of the operation of the iron ore mines of Kryvbas. **Originality.** Unlike the «classical» deterministic approaches, which are based on the use of rigid algorithms (or clear logic), systems using artificial intelligence have the properties of learning, accumulating and generalizing experience. The conducted studies compare favorably with the existing ones in that the number of control actions is variable and is determined on the basis of the presence of a correlation between the control and controlled parameters of the main technological stages and the selected criteria for the functioning of the system, this allows the implementation of decision-making automation in real production conditions: incomplete information; nonlinear characteristics; multichannel. **Practical value.** The practice of implementing the proposed scientific and practical approach allows to increase daily ore production by 14.85 %. At the same time, daily electricity consumption will likewise increase by 14.86 % (taking into account the high correlation coefficient of about 0.9), and the cost of using electricity, taking into account the three-zone tariff, grow by 10.83 %. The potential income from the sale of additional volume of iron ore raw materials fully compensates for these costs. References 10, figures 9.

Key words: power consumption, Fuzzy Logic, criteria of optimization.

REFERENCES

1. Meerov, M. V., Akhmetzyanov, A. V., & Ber-shchansky, Ya. M. (1990). *Mnogosvyaznye sistemy upravleniya [Multiconnected control systems]*. Moscow: Nauka. [in Russian]
2. Denysov, A. A., & Kolesnykov, D. N. (1982). *Teoriya bolshikh sistem upravleniya [Theory of large control systems]*. Leningrad: Enerhoizdat. [in Russian]
3. Molchanov, A. A. (1988). *Modelirovanie i proektirovanie slozhnykh sistem [Modeling and designing complex systems]*. Kyiv: Vyscha shkola. [in Russian].
4. Sinchuk, I. O. (2019). Formalizatsiya pokaznykiv balansu spozhyvannya elektrychnoyi enerhiyi pidzemnyimi zalizorudnymi pidpryyemstvamy. *Nauk.-tehn. zb. Hirnychyy visn KNU*, 105, 132–138. [in Ukrainian]
5. Kupin, A. I., Senko, A. O., & Mysko, B. S. (2018). *Identifikatsiya ta avtomatizovane keruvannya v umovakh protsesiv zbagachuvanoi tekhnologii na osnovi metodiv obchislyval'nogo intelektu: monografiya [Identification and automated control of processing technology based on computational intelligence]*. Kryvyi Rih: FOP Chernyavskyy D.O. [in Ukrainian]
6. Leonynkov, A. V. (2003). *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in the environment MATLAB and fuzzyTECH]*. Sankt Peterburh: BHV–S.Peterburh. [in Russian]
7. Bodyansky, Ye. V., Kuchenrenko, Ye. I., Mykhalov, O. I., Filatov, V. O., & Hasyk, M. M. (2011). *Metodi obchislyval'nogo intelektu v sistemakh keruvannya keruvannya tekhnologichnimi protsesami ferosplavnogo virobnitstva: monografiya [Methods of computational intelligence in control systems of process control of ferroalloy production]*. Dnipropetrovsk: NMetAU. [in Ukrainian]
8. Kupin, A., & Senko, A. (2015). Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes. *CEUR Workshop Proceedings*, 1356, 153–160.
9. Dorf, R., & Bishop, R. (2004). *Sovremennye sistemy upravleniya [Modern control systems]*. Moscow: Laboratory of Basic Knowledge. [in Russian]
10. Electricity tariffs (for domestic customers). Retrieved from <https://dnep.com.ua/tariffs-home-clients/> [in Ukrainian]

Стаття надійшла 28.09.2019.