

УДК 004.942:669.013.6

Г.Л. Євтушенко, О.І. Михальов, В.І. Кузнецов

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Запропонована загальна концепція системної моделі, заснована на об'єднанні методів багатокритеріального аналізу та пошукової оптимізації у вирішенні проблеми раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів металургійного виробництва.

Ключові слова: вторинні енергетичні ресурси металургійного виробництва, системне моделювання, методи багатокритеріального аналізу, пошукова оптимізація.

Предложена общая концепция системной модели, основанная на объединении методов многокритериального анализа и поисковой оптимизации в решении проблемы рационального использования вторичных энергетических ресурсов металлургического производства.

Ключевые слова: вторичные энергетические ресурсы металлургического производства, системное моделирование, методы многокритериального анализа, поисковая оптимизация.

There was proposed the general vision of system model to solve the issue of the rational recyclable energy resources use at the metallurgical production. It is based on the multiple-criteria decision analysis and optimal solutions search methods integration.

Key words: recyclable energy resources of the metallurgical production, system modeling, methods of multiple-criteria decision analysis, optimal solutions search.

Вступ

Чорна металургія являє собою сформовану галузь з добре відпрацьованими технологіями основного виробництва, заміна або істотна модернізація яких вимагає величезних капітальних витрат. Металургійне підприємство виробляє значні обсяги вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) – горючих газів, пару, тепла. Утилізація (використання) горючих і теплових ВЕР чорної металургії дозволяє економити більше 35...50% потреби галузі в теплоті. Наприклад, металургійний комбінат повного циклу потребує на рік близько 8 млн. т умовного палива, з них внутрішніми паливними ресурсами забезпечується 2.5 млн. т доменним газом та 1.5 млн. т коксовим [1, 2].

Разом з тим, проблема раціонального використання ВЕР металургії залишається актуальною в таких аспектах: виробничому, енергетичному, економічному, екологічному [1 ... 3]. Просування у вирішенні цієї проблеми дозволяє знизити споживання первинних енергоресурсів (природний газ, електроенергія) і зменшити обсяги забруднень і, враховуючи зростаючу вартість первинних енергоресурсів, отримати суттєвий економічний ефект [1 ... 3].

Математичне моделювання процесів розподілу та використання ВЕР дозволяє оптимізувати ці процеси, підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. Таке моделювання, враховуючи складність системи, повинне ґрунтуватися на методах системного аналізу та сучасних інформаційних технологіях [4, 5].

Багатокритеріальний аналіз (БКА) з використанням сучасних інформаційних технологій, реалізованих у вигляді системи підтримки прийняття рішень, дозволяє порівняти різні варіанти утилізації ВЕР з урахуванням всіх істотних чинників проблеми.

В [2] розроблена модель оптимального розподілу ВЕР за двома скалярними критеріями – енергетичним та економічним і показана можливість подальшого (приблизно на 15%) зниження потреб у зовнішніх енергетичних ресурсах – природному газі та електроенергії з ОЕС. Тим самим знижуються і витрати на придбання цих ресурсів.

Слід зазначити, що модель [2, гл.11] розроблена для стабільних зовнішніх умов – цін на ресурси та обсягів випуску основної продукції. Для сучасних умов більш характерні волатильність (мінливість) цих зовнішніх умов і невизначеності в їх змінах (ситуація невизначеності).

У фундаментальній роботі [3] розглянуті сучасний стан, проблеми і технології ресурсо- та енергозбереження, в тому числі і за рахунок раціонального використання ВЕР. Проаналізовано як традиційні, так і нові технології чорної металургії («металургія заліза»). Особливу увагу приділено екології, технологіям, що знижує забруднення. Представлена методологія вибору технології металургійного виробництва [3, гл. 12].

З точки зору багатокритеріального аналізу, ця методологія являє собою концепцію проблеми складного багатокритеріального вибору. Порівняння проводиться по 11 критеріям, показники альтернатив (тобто порівнюваних технологій) розраховуються за спеціальними методиками. Таким чином, аналіз показав, що в системну модель використання вторинних енергетичних ресурсів доцільно включити можливості векторної оптимізації з урахуванням варіантів зовнішніх умов для ситуацій невизначеності і ризику.

На основі аналізу проблеми нами сформульовані 3 завдання зростаючої складності: порівняльний багатокритеріальний аналіз заданих технологій; оптимізація розподілу ресурсів; порівняльний аналіз оптимізованих технологій.

Обґрунтовано застосування розроблених на кафедрі інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України інтегрованих методів БКА та системи підтримки прийняття рішень NooTron [6].

Вторинні енергетичні ресурси

Під вторинними енергетичними ресурсами (ВЕР) розуміють енергетичний потенціал продукції, відходів, побічних і проміжних

продуктів, що утворюються при технологічних процесах, в агрегатах і установках, який не використовується в самому агрегаті, але може бути частково або повністю використаний для енергозбереження інших агрегатів (процесів).

По виду енергії ВЕР поділяються на горючі (паливні), теплові та надлишкового тиску.

Горючі ВЕР – побічні газоподібні продукти технологічних процесів, які можуть бути використані в якості енергетичного або технологічного палива.

Теплові ВЕР – фізична теплота основних і побічних продуктів, відхідних газів технологічних агрегатів, а так само систем охолодження їх елементів.

ВЕР надлишкового тиску – потенційна енергія газів, що виходять з технологічних агрегатів з надлишковим тиском, яке може бути використане для інших видів енергії.

Загальні характеристики ВЕР та методи використання наведені в книгах [1...3].

Схематично класифікація вторинних енергетичних ресурсів, утилізація яких здійснюється на металургійних підприємствах, наведена на рис. 1 [3].

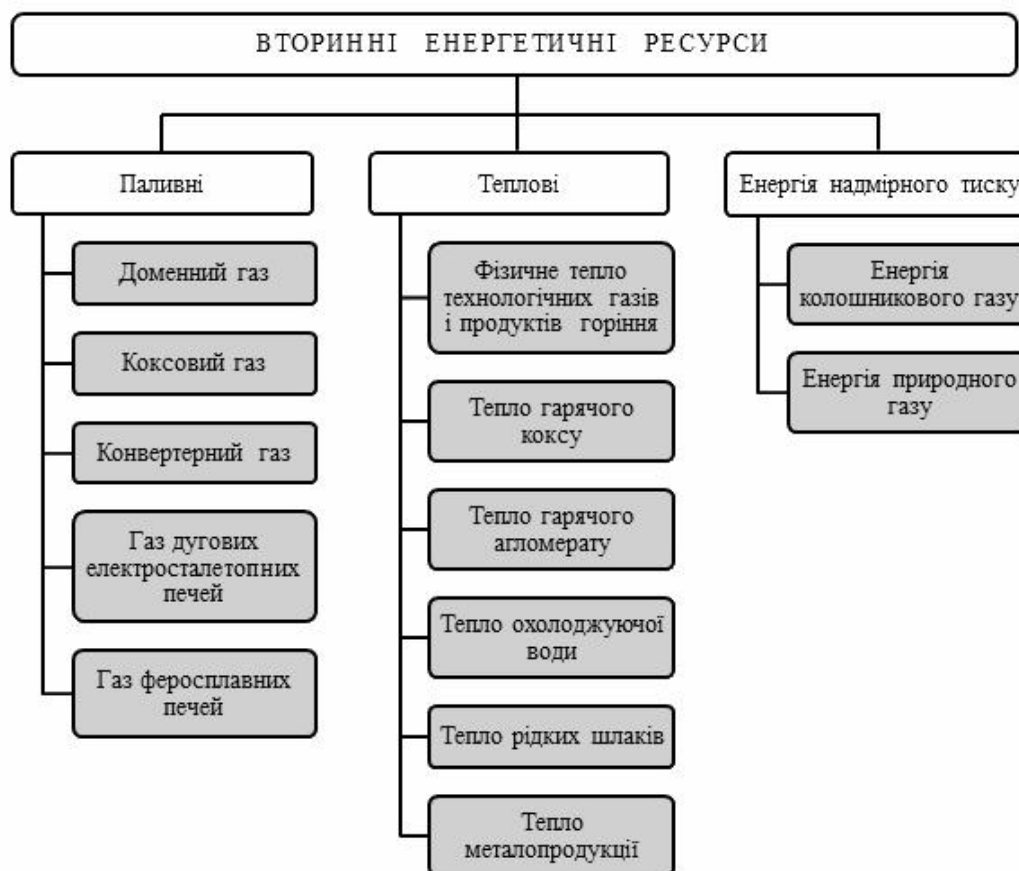


Рисунок 1. – Вторинні енергетичні ресурси металургійних підприємств

Системний підхід

Системний підхід до раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів передбачає порівняльний аналіз існуючих технологічних схем і оптимізацію їх використання з урахуванням всіх істотних чинників.

Це можливо здійснити за допомогою методів багатокритеріального аналізу і системного моделювання. Тобто йдеться про багатокритеріальний порівняльний аналіз та багатокритеріальну (векторну) оптимізацію [4 ... 7].

Багатокритеріальний аналіз (БКА) – це практична реалізація структури системного дослідження у вирішенні складних, комплексних проблем. БКА забезпечує раціональний, систематизований і прозорий процес прийняття рішень при аналізі впливів і взаємозв'язків у складних системах. У багатокритеріальному аналізі порівнюювані об'єкти називаються альтернативами. Під об'єктами розуміються як існуючі системи, технології, так і проекти. Критерій – кількісна або якісна характеристика, істотна для судження про об'єкт. Показник – кількісна або якісна оцінка оцінюваного об'єкта за певним критерієм.

Методів БКА розроблено досить багато, кожен з них має переваги, недоліки, обмеження і, відповідно, переважні сфери застосування. Ці методи поділяються на кількісні (кардинальні) і порядкові (ординальні) [5, 7, 8].

Методи БКА використовуються для різноманітних завдань, для нас цікаві наступні: вибір кращої альтернативи, багатокритеріальна оптимізація, прийняття проектних рішень, оцінка ефективності. Ці методи трудомісткі, їх доцільно використовувати у складі комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень (СППР) [7 ... 9].

Системна модель

Системне моделювання може бути охарактеризоване як інтерактивне моделювання із «вбудованими» в модель методами аналізу рішень (багатокритеріального аналізу) та оптимізації. Системна модель може бути коротко охарактеризована як інтерактивна модель, що використовує методи системного аналізу, знання проблемної області, інформаційні технології.

Найбільш універсальним методом аналізу та оптимізації складних систем є імітаційне моделювання. Аналіз існуючих підходів до побудови моделей (в імітаційному моделюванні вони називаються парадигмами) показав, що виходячи із специфіки предметної області, – виробництва та утилізації вторинних енергетичних ресурсів, – для цілей нашого дослідження найбільш підходить парадигма системної динаміки [4].

Аналіз проблем включає в себе методи багатокритеріального аналізу, які дозволяють проводити багатокритеріальну оптимізацію, порівнювати альтернативні варіанти (технології та схеми утилізації в нашому випадку) за сукупністю критеріїв, оцінювати ефективність проектів [5, 9]. Необхідною складовою системної моделі є інтерактивна взаємодія з дослідником. Це забезпечується СППР NooTron [6].

Структура системної моделі в цілому представлена на рис. 2. Зупинимося на складових моделі.

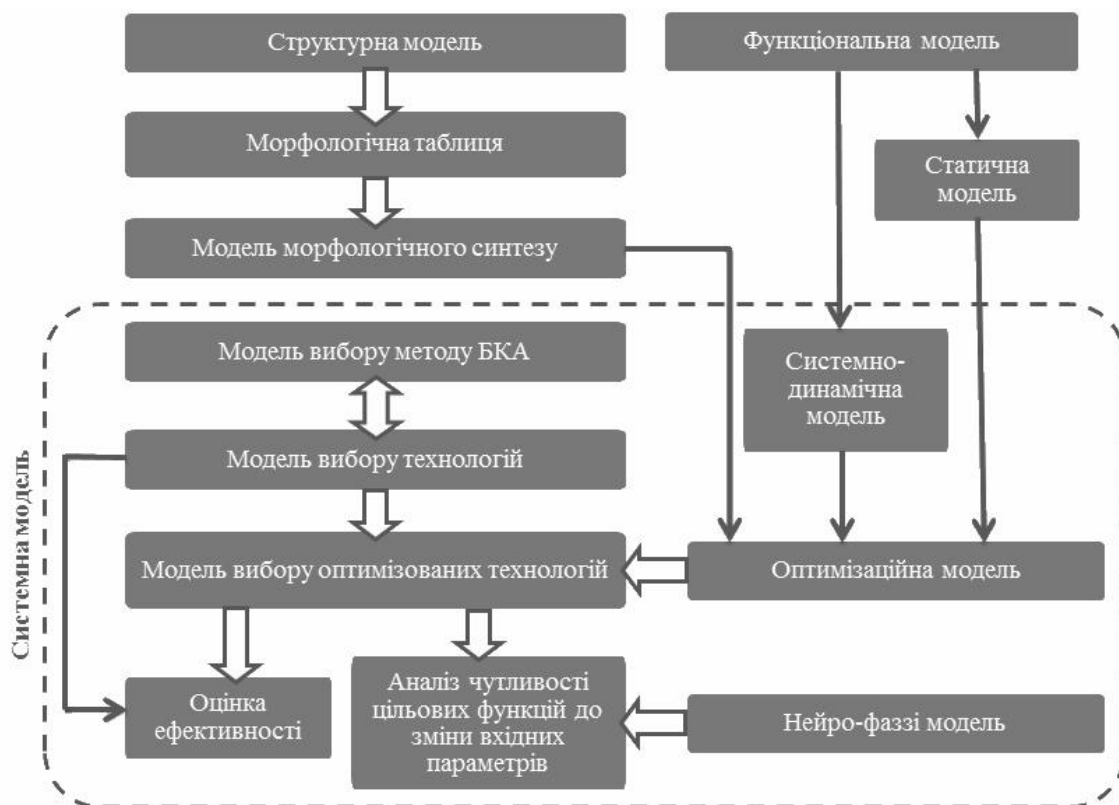


Рисунок 2. – Структура системної моделі

Основою структурної моделі є узагальнена модель металургійного підприємства повного циклу. Підприємство розглядається тільки (спрощення реальної предметної області) як споживач зовнішніх енергетичних ресурсів та генератор (виробник) внутрішніх енергетичних ресурсів, які використовуються всередині підприємства, а надлишок викидається в навколишнє середовище. Узагальнений характер моделі полягає в тому, що деякі етапи використання ВЕР можуть включатися в загальну модель та виключатися з неї так само як і варіанти використання ВЕР на кожному рівні.

Потоки ВЕР відповідають основним технологіям металургійного виробництва та супутнім їм енергетичним потокам. За основу взяті технології основного виробництва та варіанти використання вторинних енергетичних ресурсів з книг [1 ...3]. Технологічні агрегати металургійного виробництва та їх продукція і відходи розглядаються в схемі виключно як джерела та споживачі енергетичних ресурсів – це головне спрощення. Враховано, що деякі споживачі є джерелами ВЕР для споживачів наступного рівня.

В структурну модель включені всі джерела, види ресурсів та варіанти використання з книг [1...3]. В цілому структурна модель є масштабованою, як «в ширину», так і «в глибину», додаючи нові типи джерел і споживачів, нові підрівні.

Структурна модель використовується в системно-динамічній моделі та в оптимізаційній моделі.

Статична модель. Теоретично, специфіка металургійного виробництва, особливо в плані енергоресурсів добре підходить до системно-динамічного моделювання. Але з причини складності завдання, доцільним можуть виявитися моделювання і, особливо, оптимізація, не в безперервному часі, а для декількох «статичних» періодів з усередненими характеристиками. Зі збільшенням числа таких періодів статична модель наближається до системно-динамічної.

Системно-динамічна модель служить для розрахунку в часі змін параметрів, зовнішніх умов при різних сценаріях. Відповідно – для оптимізації цільових функцій або спільно з оптимізаційною моделлю, або самостійно (пошукова оптимізація).

Відповідно до концепції системної динаміки, основними об'єктами такої моделі є «накопичувачі» і «поток». Накопичувач – це об'єкт, що містить (або виробляє) деякий «ресурс». Величина ресурсу в накопичувачі називається «рівнем» або «об'ємом». Потік – це безперервне (або частково-безперервне) переміщення ресурсу між накопичувачами. У нашому випадку накопичувач – це агрегат металургійного виробництва, який виробляє вторинний (внутрішній) енергетичний ресурс. Наприклад, це доменна піч, яка виробляє (в нашій моделі) паливний ресурс – доменний газ.

Динаміка накопичувача (тобто агрегату, що споживає / виробляє енергетичні ресурси) в диференціальній формі може бути представлена формулою (1).

$$\frac{dV_{ij}}{dt} = \sum_j I_{ij}^{in} - \sum_j I_{ij}^{out} \quad (1)$$

В інтегральній формі:

$$V_{ij}(t) = \int_0^t (\sum_j I_{ij}^{in} - \sum_j I_{ij}^{out}) ds + V_0, \quad (2)$$

де i – № агрегату; j – № ресурсу; t – час; $V_{ij}(t)$ – об'єм ресурсу j в агрегаті i ; I_{ij} – потік ресурсу j в агрегаті i ; in – вхідний енергетичний ресурс; out – вихідний енергетичний ресурс; s – змінна інтегрування.

У моделі використовується диференціальна форма.

Ресурс ВЕР розподіляється між агрегатами наступного рівня.

Схема розподілу вихідного ресурсу Id_{ij} :

$$Id_{ij} = \delta_{ij} x_{ijk} I_{ij}^{out}, \quad (3)$$

де $\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо агрегат } i \text{ не виробляє ресурс } j \\ 1, & \text{в зворотньому випадку} \end{cases}$, $0 < x_{ijk} \leq 1$ – частка

ресурсу j агрегату i , що направляється на агрегат k наступного рівня, включаючи зовнішнє середовище, $\sum_j x_{ijk} = 1$ для усіх i, k – умова розподілення.

Таким чином, агрегати металургійного виробництва є джерелами («накопичувачами» в термінах СД) внутрішніх енергоресурсів, потоки (і об'єми) яких повинні бути оптимальним чином розподілені між «накопичувачами» наступного рівня (наприклад, утилізаційними установками) відповідно до варіантом розподілу. Так встановлюється зв'язок між системно-динамічною та оптимізаційною моделями.

Оптимізаційна модель

Призначена для розрахунку окремих (скалярних) цільових функцій («критеріїв»), для пошуку значень параметрів, що доставляють екстремуми скалярним цільовим функціям та для багатокритеріальної (векторної) оптимізації.

Якщо приймати технології основного виробництва заданими, то задачу оптимального використання ВЕР можна представити як модель оптимального розподілу цих ресурсів у теплоенергетичній системі металургійного комбінату [2]. Модель формалізована як векторна (багатокритеріальна) задача нелінійного програмування. Вона може використовуватися як самостійно (на базі статичної моделі), так і спільно з системно-динамічною моделлю. Оптимізаційна частина моделі заснована на моделі з [2], але оптимізація в ній – векторна, з гнучким складом критеріїв і різними методами їх згортки в узагальнений показник (або перетворення в кілька показників – при оцінці ефективності). Далі у статті розглядається саме оптимізаційна модель. Оптимізується розподіл доменного та коксового газу між споживачами ВЕР. За основу взята модель з [2]. Основні відмінності від моделі [2]:

1. Гнучка відкрита структура, що дозволяє включати і виключати окремі технології, як основного виробництва, так і технології використання ВЕР.
2. Багатокритеріальна оптимізація на основі методів БКА, інтегрованих у СППР NooTron [6].
3. Урахування фактору часу на основі системної динаміки [4].
4. Урахування варіантів зовнішніх умов [8, 9].
5. Це – частина загальної системної моделі.

Модель містить:

1. Критерії (узагальнені скалярні цільові функції).
2. Постійні параметри.
3. Змінні параметри в «натуральному вигляді» (у них входять і параметри, що оптимізуються).
4. Параметри, що оптимізуються, у відносному вигляді.
5. Балансові співвідношення, що зв'язують параметри п.п. 1 і 2.
6. Обмеження на параметри п.4.
7. Зовнішні змінні (задаються).
8. Проміжні розрахункові змінні (використовуються в п.п. 1-6).

Цільові функції через їх громіздкість в явному вигляді не виписуються, а розраховуються алгоритмічно. Оптимізація проводиться для річного циклу за періодами. У моделі [2] два періоди – холодний (зимовий опалювальний) і теплий (літній). Наша модель дозволяє збільшувати кількість періодів. Також можна перейти до безперервного часу, тобто проводити оптимізацію безпосередньо по системно-динамічній моделі. Питання про оптимальну кількість періодів і доцільність безперервної (за часом) постановки задачі потребує окремого дослідження разом з фахівцями предметної області.

У загальному вигляді математичне формулювання оптимізаційної моделі можна представити так:

$$Cr_i(\bar{Z}) = \sum_j w_{ij} \cdot Z_j \rightarrow \min \text{ для всіх } i, \\ Z_i = Z_i(\bar{y}, \bar{x}, \bar{a}), \\ 0 < x_k \leq 1 \text{ для всіх } k, \quad (4)$$

де Cr_i – скалярний критерій (цільова функція) верхнього рівня; \bar{Z} – вектор агрегованих параметрів, що оптимізуються; \bar{y} – вектор «натуральних» параметрів, що оптимізуються; \bar{x} – вектор відносних параметрів, що оптимізуються; вони пов'язані з частками x_{ijk} в системно-динамічній моделі; \bar{a} – вектор заданих параметрів.

Оптимізація полягає в пошуку для кожного критерію наборів відносних параметрів, що доставляють мінімум кожному критерію. У кожного з критеріїв цей набір буде в загальному випадку свій. В якості методів оптимізації обрані пошукові методи. Перевагами пошукових методів є їх універсальність і можливість отримання багатьох субоптимальних (за кожним скалярним критерієм) рішень.

Недоліки: пошукові методи трудомісткі і не гарантують отримання точного (у математичному сенсі) глобального оптимального рішення. Але перший недолік долається зростаючої продуктивністю обчислювальної техніки. Другий недолік є неактуальним для більшості практичних задач, оскільки вихідні дані, як правило, неточні (особливо в такій галузі, як металургія).

Застосування пошукових методів найкращим чином відповідає сучасній методології дослідження та синтезу складних систем, заснованої на моделях і комп'ютерних експериментах. У поєднанні зі сценарним підходом це дозволяє отримати загальну картину проблеми необхідної деталізації, виявити не тільки оптимум, а й «вузькі місця», резерви, дослідити поведінку системи при зміні зовнішніх умов. На цьому шляху можна підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. У тому числі – по синтезу технологій.

Багатокритеріальна частина моделі включає інтегровані методи багатокритеріального аналізу і методологію оцінки ефективності BOCR

(«вигоди – можливості – витрати – ризики») [5, 9]. Ці методи реалізовані в СППР NooTron [6].

Наведемо методику оптимізації на основі загальної моделі (4).

Розрахунок цільових функцій моделі через їх громіздкість виконується алгоритмічно і складається з 6-ти етапів:

1. Задаються 25 вихідних даних (a_i).

2. Задаються 26 додаткових даних для розрахунків (g_i).

3. Задається набір з 12-ти відносних оптимізуємих параметрів ($x_i, i \in [1;12]$).

а) Обмеження: $0 \leq x_i \leq 1$.

б) Усі x_i – безрозмірні величини, виражаються через розрахункові параметри y_i .

в) Усі x_i – для одного сезону, для наступного – свій набір і знову – оптимізація.

г) Методи оптимізації: дискретизація для всіх x_i з деяким кроком (Δh_i) та повний перебір по всім x_i (Δh_i); дискретизація та випадковий пошук: формування випадкових векторів з випадкових величин x_i , рівномірно розподілених на $[0; 1]$.

4. Розраховуються проміжні дані (y_i).

5. Для кожного набору \bar{X} розраховуються значення цільових функцій $Cr_1(\bar{X}), Cr_2(\bar{X})$ [2]:

а) енергетичний критерій – приведена витрата привізного умовного палива, споживаного комбінатом (природний газ та електроенергія з регіональної електромережі):

$$Cr_1(\bar{X}) = z_1 + b_{11} \cdot z_2 \rightarrow \min ; \quad (5)$$

б) економічний критерій – сума витрат на приведену витрату умовного палива:

$$Cr_2(\bar{X}) = b_{21} \cdot z_1 + b_{22} \cdot z_2 \rightarrow \min . \quad (6)$$

Тут z_1 и z_2 – річна витрата природного газу та електроенергії відповідно (7), (8).

$$z_1 = \sum_{i=1}^N y_{86}^i \quad (7)$$

$$z_2 = \sum_{i=1}^N y_{87}^i \quad (8)$$

b_{11} – середня питома витрата умовного палива на відпуск електроенергії (з урахуванням втрат ЛЕП) в даній ОЕС, кг/(кВт·год.); b_{21} – ціна на природний газ (грн./т); b_{22} – ціна на електроенергію (грн./(МВт·год.)).

Екологічний критерій (мінімум зваженої суми викидів) [3] нижче не оптимізується, бо у статичній моделі обсяг втрат ВЕР є заданим.

6. Для подальшого багатокритеріального аналізу знаходяться субоптимальні значення (наприклад, по 10 кращих значень для кожної скалярної цільової функції) і відповідні їм набори $\bar{X}^{opt} = \{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}^{opt}$.

7. Розрахунковими даними заповнюється матриця корисностей. На її основі із застосуванням інтегрованого методу МАІ + ММР (метод аналізу ієрархій та метод матриці рішень) [8] проводиться багатокритеріальний аналіз субоптимальних варіантів. На цій основі приймається рішення про кращий варіант за сукупністю розглянутих критеріїв. Альтернативами в матриці корисностей служать субоптимальні варіанти, їх число можна варіювати. Варіанти зовнішніх умов задаються як комбінації з трьох можливих рівнів (низький – середній – високий) для двох критеріїв – енергетичного та економічного.

Використання методу матриці рішень дозволяє провести порівняльний аналіз субоптимальних варіантів, отриманих за оптимізаційної моделі, враховуючи можливі варіанти зовнішніх умов, такі, наприклад, як зміна цін на споживані енергетичні ресурси (у нашому випадку – на газ та електроенергію). На цій основі вибираються варіанти, кращі як по кожному критерію, так і за сукупністю критеріїв, тобто проводиться векторна оптимізація з використанням, наприклад, методу аналізу ієрархій (МАІ) або методу аналізу мереж (ММР). Застосовується інтегрований метод «метод аналізу ієрархій + метод матриці рішень» (МАІ + ММР) дозволяє провести аналіз із одночасним застосуванням декількох правил вибору кращої альтернативи (так званих «критеріїв ММР») [8].

Для проведення багатокритеріального аналізу та векторної оптимізації застосовується система підтримки прийняття рішень NooTron. СППР розроблена на кафедрі інформаційних технологій і систем НМетАУ, її основу складають методи багатокритеріального аналізу. СППР у вигляді веб-додатку знаходиться у вільному доступі за адресою: <http://nootron.net.ua>. У ній є «Довідка» з докладним описом методів і прикладами розв'язання задач [6].

СППР NooTron, побудована на базі сучасних інформаційних технологій, дозволяє забезпечити таку властивість системної моделі, як інтерактивність. СППР крім іншого дозволяє підвищити оперативність виконання багатокритеріального аналізу.

Багатокритеріальна оптимізація розподілення горючих ВЕР

На основі запропонованої методики проведено багатокритеріальну оптимізацію розподілення горючих ВЕР металургійного заводу з наступним базовими вхідними показниками (табл. 1), показники 1-3 узяті з [2], ціни на енергоносії узяті за 2014 рік.

Таблиця 1

Вхідні показники для оптимізації розподілення горючих ВЕР

№	Назва показника	Значення
1	Ресурси доменного газу (т у.п./рік)	2556000
2	Ресурси коксового газу (т у.п./рік)	1541000
3	Продуктивність прокатних станів (т сталі/рік)	8000000
4	Ціна на природний газ (грн./т)	3539,35
5	Ціна на електроенергію (грн./(МВт·год.)).	1162,9

Багатокритеріальна оптимізація складалася з двох етапів: 1) пошук наборів \bar{X} (12-компонентних векторів параметрів, що оптимізуються), які відповідають кращим значенням цільових функцій Cr_1 та Cr_2 ; 2) багатокритеріальний аналіз кращих наборів \bar{X} з урахуванням варіантів зовнішніх умов.

Для пошуку кращих значень цільових функцій Cr_1 та Cr_2 на основі загальної моделі (4) розроблена програма оптимізації розподілення горючих ВЕР, метод оптимізації – метод повного перебору (brute force) з певним кроком дискретизації по x_i , який задається.

Під час виконання оптимізації з кроком 0,25 по кожному x_i перебрано 244140625 наборів \bar{X} . У результаті знайдено кращі значення цільових функцій $Cr_1 = 3214,9$ (тис. т у.п.) та $Cr_2 = 1068,29$ (млн. грн.), а також відповідний їм набір \bar{X} . Він виявився оптимальним для обох критеріїв, що можна пояснити їх лінійною залежністю від проміжних критеріїв z_1 та z_2 (7, 8).

Для аналізу отриманого результату розраховано Δ_1 (9) та Δ_2 (10) серед 10, 100 та 1000 кращих значень кожної цільової функції (рис. 3, 4).

$$\Delta_1^j = Cr_i^j - Cr_i^1, \quad (9)$$

де Δ_1^j – відстань між j-тим та першим кращими значеннями цільової функції Cr_i ; Cr_i^j – j-те краще значення цільової функції Cr_i ; Cr_i^1 – 1-ше краще значення цільової функції Cr_i .

$$\Delta_2^j = \overline{Cr_i^{[1:j]}} - Cr_i^1, \quad (10)$$

де Δ_2^j – відстань між середнім серед [1; j] та першим кращими значеннями цільової функції Cr_i ; $\overline{Cr_i^{[1:j]}}$ – середнє значення цільової функції Cr_i серед [1; j]; Cr_i^1 – 1-ше краще значення цільової функції Cr_i .

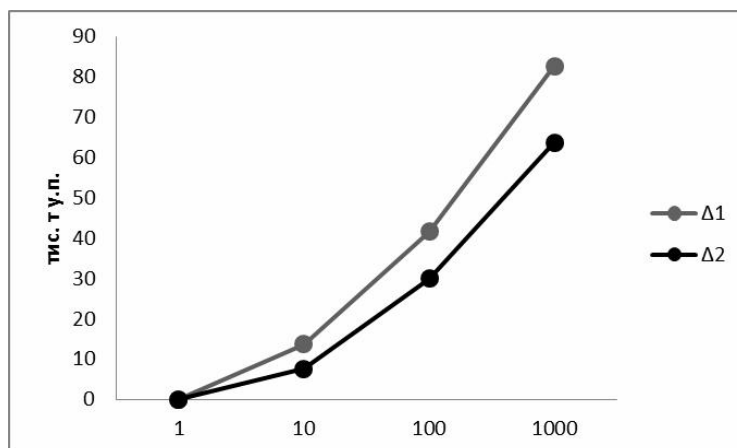


Рисунок 3. – Графік відмінності кращого значення Cr_1

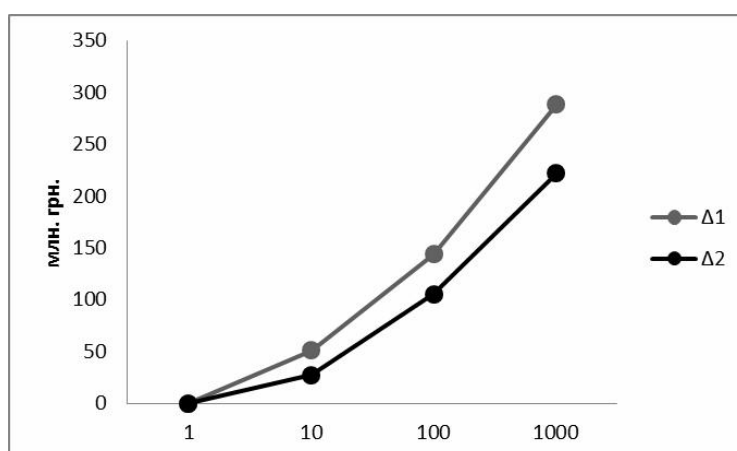


Рисунок 4. – Графік відмінності кращого значення Cr_2

Значення кожної цільової функції залежить не тільки від \bar{X} , але й від таких параметрів, як b_{11} , b_{21} , b_{22} (5),(6), що можуть змінюватись. Тому доцільно провести багатокритеріальний аналіз кращих наборів \bar{X} (табл. 2) з урахуванням варіантів зовнішніх умов.

Для цього запропоноване наступне розширення інтегрованого методу МАІ+ММР: 1) для кожного критерію розраховується власна матриця корисностей; 2) за обраними правилами ММР розраховуються узагальнені корисності альтернатив (наборів); 3) за МАІ на основі отриманих узагальнених корисностей синтезуються пріоритети альтернатив щодо кожного критерію; 4) з урахуванням пріоритетів критеріїв на базі МАІ розраховуються глобальні пріоритети альтернатив (наборів) за сукупністю критеріїв.

Таблиця 2

Показники наборів \bar{X} , відібраних до аналізу

№ набору \bar{X}	z_1 (т у.т.)	z_2 (МВтч)	Cr_1 (тис. т у.п.)	Cr_2 (млн. грн.)
39687504	5341,94	9170167,97	3214,90	10682,90
40087504	14172,51	9161381,88	3220,66	10703,93
87890629	5279,21	9200527,05	3225,46	10717,98
39062503	33425,05	9128782,69	3228,50	10734,16
88996879	10454,04	9195378,28	3228,84	10730,31
40006253	34829,33	9127385,48	3229,41	10737,51
136718754	5216,49	9230886,12	3236,03	10753,06

Для розрахунку матриць корисностей альтернатив (наборів \bar{X} з табл. 2) прийнято, що значення показника b_{11} може збільшитися / зменшитися на 15%, для показників b_{21} , b_{22} – збільшитися / зменшитися на 20%. Відносно енергетичного критерію (Cr_1 , (5)) отримана матриця корисностей для 3-х варіантів зовнішніх умов: $V_1 = \{b_{11}, b_{11} + 15\%, b_{11} - 15\%\}$. Для економічного критерію (Cr_2 , (6)) отримана матриця корисностей для 9-ти варіантів зовнішніх умов: $V_2 = \{\{b_{21}, b_{22}\}, \{b_{21}, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21}, b_{22} - 20\%\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22}\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21} + 20\%, b_{22} - 20\%\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22}\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22} + 20\%\}, \{b_{21} - 20\%, b_{22} - 20\%\}\}$.

Щодо кожного критерію розраховані узагальнені корисності альтернатив за правилами Гурвіца ($c = 0,5$) (нормовані на максимум) та Севіджа (нормовані на мінімум), відносні показники корисностей наведені на рис. 5, 6.

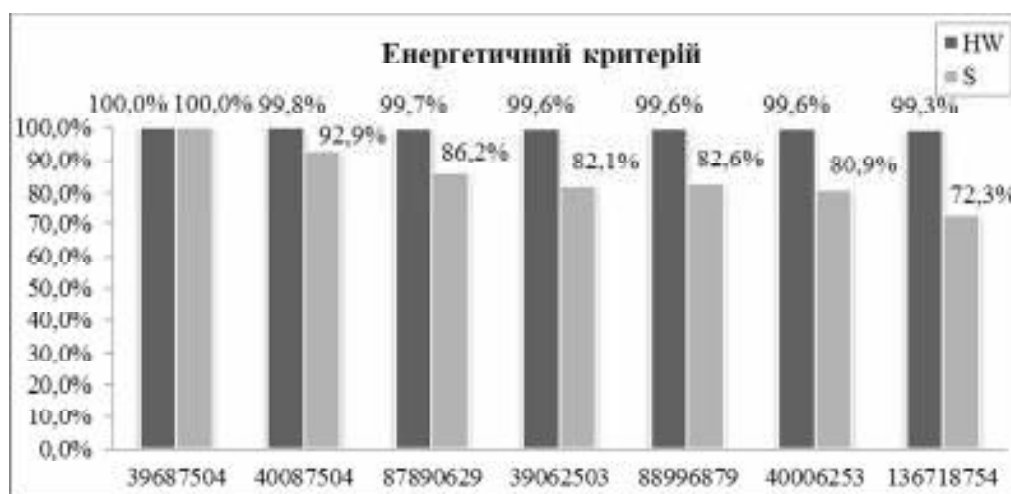


Рисунок 5. – Діаграма відносних корисностей наборів \bar{X} за енергетичним критерієм

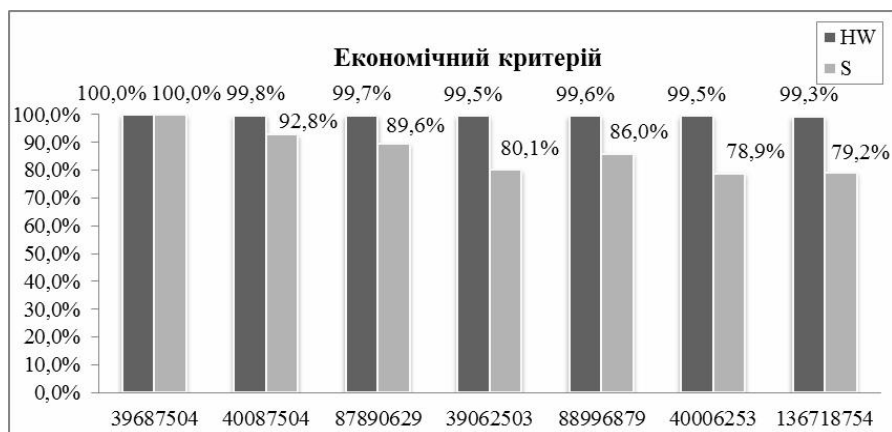


Рисунок 6. – Діаграма відносних корисностей наборів \bar{X} за економічним критерієм

На наступному етапі отримані пріоритети альтернатив за кожним критерієм (рис. 7).

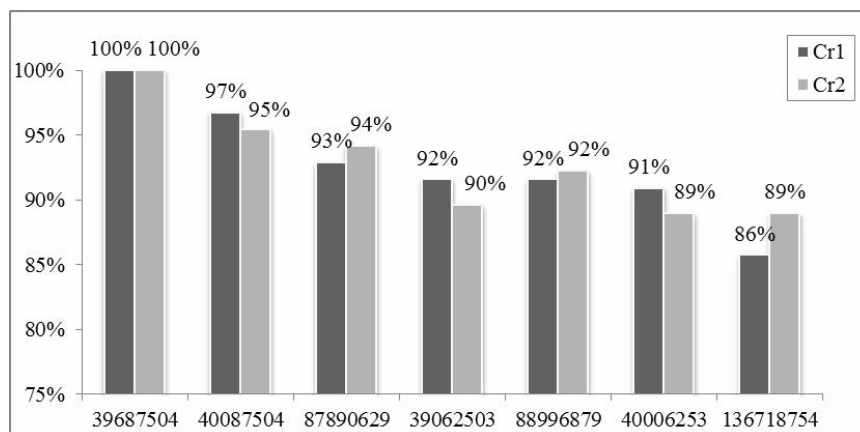


Рисунок 7. – Діаграма відносних пріоритетів наборів \bar{X} за критеріями Cr_1 та Cr_2

На заключному етапі розраховані глобальні пріоритети наборів за сукупністю критеріїв (рис. 8).

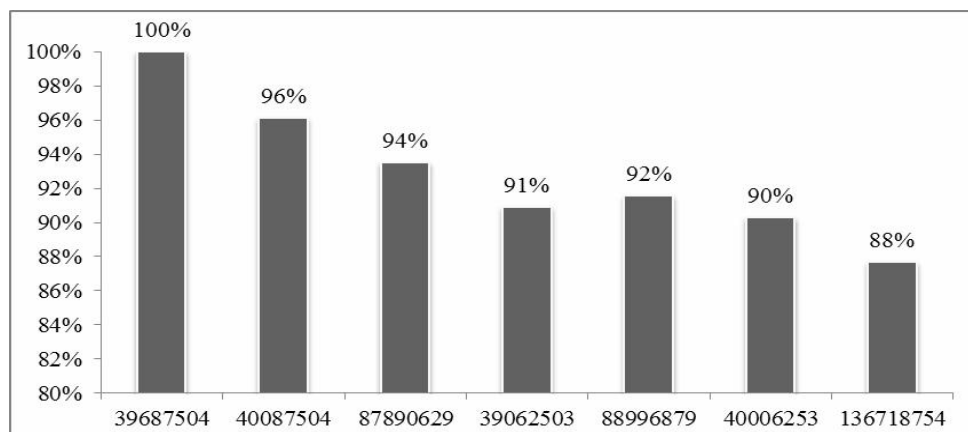


Рисунок 8. – Діаграма відносних глобальних пріоритетів наборів \bar{X}

Проведений багатокритеріальний аналіз підтвердив, що отриманий набір \bar{X} (39687504) є кращим за сукупністю критеріїв також і з урахуванням можливих змін зовнішніх умов. Отже, запропонована методика дозволяє отримувати загальне рішення багатокритеріальної задачі не тільки за декількома правилами ММР, як в інтегрованому методі МАІ+ММР, але й узагальнює рішення для потрібної кількості матриць корисностей.

Висновки

Проблема раціонального використання ВЕР металургії залишається актуальною в таких аспектах: виробничому, енергетичному, економічному, екологічному. Математичне моделювання процесів розподілу та використання ВЕР дозволяє оптимізувати ці процеси, підвищити обґрунтованість проектних та організаційних рішень. Таке моделювання, враховуючи складність системи, повинне ґрунтуватися на методах системного аналізу та сучасних інформаційних технологіях.

Запропонована загальна концепція системної моделі, заснована на об'єднанні методів багатокритеріального аналізу та пошукової оптимізації у вирішенні проблеми раціонального використання вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) металургійного виробництва.

Відповідно до принципів системного моделювання, побудована схема системи взаємопов'язаних математичних моделей із застосуванням різного математичного апарату і сучасних інформаційних технологій. Для проведення багатокритеріального порівняльного аналізу забезпечено інтерактивну взаємодію на основі використання системи підтримки прийняття рішень NooTron (<http://nootron.net.ua>).

Розроблено новий комбінаторний підхід до обліку можливих змін зовнішніх умов: аналіз великого числа субоптимальних варіантів для можливих поєднань варіантів зовнішніх умов та декількох матриць корисностей. Вирішена модельна задача оптимального розподілу зовнішніх і внутрішніх (доменний та коксовий газ) енергетичних ресурсів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы чёрной металлургии и их использование. К.: Вища шк. 1988. – 304 с.
2. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
3. Ярошенко Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособие / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходоровская. Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ» 2012. – 670с.
4. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург. – 2006. – 400 с.
5. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
6. Система поддержки принятия решений NooTron [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nootron.net.ua>

7. Микони С.В., Ходаковский В.А. Основы системного анализа. – СПб.: Изд-во ПГУПС, 2011. – 143 с.
8. Михалёв А.И., Кузнецов В.И., Ковалик Н.Н., Теплякова Г.Л. Интеграция методов багатокритеріального анализа и их применение в системе поддержки принятия решений // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4 (75). – Дніпропетровськ, 2011.
9. Михалев А.И., Кузнецов В.И., Теплякова Г.Л. Оценка эффективности проектов объединенным методом багатокритеріального анализа // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3(80). – Днепропетровск, 2012. – С.113-121.
10. Евтушенко Г.Л., Кузнецов В.И., Михалёв А.И. Системная модель использования внутренних энергетических ресурсов металлургического предприятия // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: ХНТУ, 2014. – С. 70-71.
11. Evtushenko G., Mikhalyov A., Kuznetsov V. The Strategies of System Model Synthesis: General Approach // Computer Science & Information Technologies (CSIT'2014), November 2014, Lviv, Ukraine. – P. 87-88