

УДК 004.942:519.816

В.И. Кузнецов, Г.Л. Евтушенко, В.С. Вьюненко, А.А. Ткаченко
**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МЕТОДОВ
КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ**

Аннотация. В статье предлагается подход к многокритериальной оптимизации, основанный на совместном использовании поисковых методов и методов количественного анализа решений. Рассмотрено применение этого подхода в двух задачах: распределение внутренних энергетических ресурсов металлургического комбината, сравнительный анализ технологий металлургии железа.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, оптимизация, метаэвристики, метод взвешенных сумм, металлургия железа.

Введение

Технологические процессы сложных систем таких, как металлургическое производство характеризуются большим числом элементов, связи между элементами носят разнотипный, нелинейный характер. Часть информации о системе может представляться в качественном виде. Функционирование системы и управление ею происходит в условиях многокритериальности, нечеткости и неопределенности. Часто надо учитывать человеческий фактор: экспертные знания, ценности, опыт.

Применение точных количественных методов и подходов не всегда позволяют строить адекватные модели сложных технологических систем, особенно инновационных. Спектр слабо структурированных задач постоянно расширяется: управление производственными системами, распознавание сигналов и техническая диагностика, проектирование, технологическое предвидение и тому подобное.

Для решения таких задач наряду с традиционным математическим моделированием целесообразно использовать имитационное моделирование и методологии инженерии знаний, такие как: многокритериальный анализ, экспертные системы, нечеткое и нейро-нечеткое моделирование и управление. Современные информационные техно-

логии и системы, такие как системы поддержки принятия решений (СППР), позволяют объединить подходы в решении этих задач на основе современной концепции системного моделирования.

В работе предлагается подход к многокритериальному анализу и оптимизации сложных систем, основанный на совместном использовании поисковых методов и методов количественного анализа решений. Рассматривается применение этого подхода в двух задачах: распределение внутренних энергетических ресурсов металлургического комбината, сравнительный анализ технологий металлургии железа. Для многокритериального анализа выбрана СППР NooTron [1].

Векторная оптимизация и многокритериальный анализ сложных систем

Во многих сферах науки, техники и экономики встречаются задачи, в которых нужно оптимизировать несколько скалярных целевых функций. Такие задачи оптимизации называются «многокритериальными», или «векторными».

Существует несколько основных подходов к решению таких задач [2]: свертывание критериев – позволяет свести задачу к однокритериальной за счет построения «суперкритерия»; выбор одного критерия в качестве «главного», а все остальные представляются как ограничения; последовательное решение задач однокритериальной оптимизации. Широко используются методы сужения исходного множества рассматриваемых альтернатив путем построения множеств эффективных решений: Парето, Слейтера, Смейла, метод порогов не-сравнимости Руа, метод Подиновского [3].

При оптимизации сложных систем скалярные целевые функции (частные критерии) рассчитываются алгоритмически, что требует совместного применения имитационного моделирования и поисковых методов оптимизации. Некоторые из многокритериальных задач оптимизации могут быть представлены в виде математических, имитационных и других моделей. Но в случае, когда задачу нельзя решить традиционными методами за допустимое время, или когда не удастся получить четкую («физикалистскую») математическую постановку, целесообразно использовать эвристические, метаэвристические методы, а также методы, основанные на статистическом моделировании (метод Монте-Карло) и нейронных сетях.

Эвристические алгоритмы (эвристики) способны найти «удовлетворительные» решения оптимизационной задачи за приемлемое время, не обосновывая при этом их правильность или оптимальность (эмпирически). Метаэвристика же, подразумевает некую высокоуровневую стратегию, которая комбинирует, объединяет эвристические методы для решения более сложных задач [4].

На сегодня область метаэвристики достаточно развита. Эти алгоритмы классифицируют по следующим направлениям. По количеству используемых решений [4]: непопуляционные (используют одно потенциальное решение), популяционные (используют множество потенциальных решений). Непопуляционные метаэвристики подразделяются на натуральные (биологические и физические) и ненатуральные. Популяционные метаэвристики подразделяются на эволюционные (детерминированные и вероятностные), роевые (биологические и физические), иммунные, ненатуральные.

Самые известные алгоритмы локального поиска: табу-поиск, метод имитации отжига, метод поиска чередующихся окрестностей и процедура жадного случайного адаптивного поиска.

Метод полного перебора (англ. brute force method, BFM) позволяет получить любое необходимое количество субоптимальных вариантов (близких к оптимальному варианту), которое будет включать в себя и все глобально оптимальные решения.

Для решения больших, сложных, многомерных задач, в том числе задач на основе имитационного моделирования с большим количеством оптимизируемых параметров лучше подходят популяционные метаэвристики, например, эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы, алгоритм оптимизации роя частиц.

Преимуществами поисковых методов является их универсальность и возможность получения многих субоптимальных (по каждому скалярному критерию) решений, которые могут рассматриваться как «субоптимальные» альтернативы. К ним могут быть применены методы количественного анализа решений (МКА). Это такие методы, как метод анализа иерархий, метод анализа сетей, методология оценки эффективности ВОСР, метод взвешенных сумм, метод матрицы решений. В этих методах на этапе синтеза глобальных оценок используют функции свертывания критериев (свертки). Чаще всего используют такие: аддитивные функции (когда важны абсолютные значения кри-

териев); мультипликативные функции (когда важны изменения абсолютных значений критериев при варьировании управляемых параметров); максиминные, минимаксные функции выбора (когда нужно добиться равенства нормированных показателей). Для анализа и оптимизации целесообразно применять несколько сверток.

Библиотека системы поддержки принятия решений NooTron [1] на данный момент включает 10 методов многокритериального анализа: метод анализа иерархий (МАИ); метод взвешенных сумм (МВС); метод матрицы решений (ММР); метод анализа сетей; интегрированный метод МАИ + ММР; интегрированный метод МВС + МАИ; метод распознавания образов; методология ВОСР; МАИ в абсолютных измерениях; метод ранжированных весов критериев. Также разработан максиминный вариант МАИ и МВС с нелинейными свёртками (НМВС). Таким образом, СППР NooTron позволяет провести сравнительный анализ решений с использованием нескольких методов МКА и различных свёрток, на основании чего может быть повышена обоснованность принятия решений.

Многокритериальная оптимизация распределения внутренних энергетических ресурсов металлургического комбината

Задача максимального использования ВЭР имеет не только экономическое, но и экологическое значение, поскольку снижение расхода топлива, за счет использования ВЭР, позволяет снизить вредные выбросы и снижает загрязнение окружающей среды [5...7].

Задача оптимизации распределения ВЭР металлургического комбината, которое является сложной системой, относится к многокритериальным задачам, так как содержит несколько скалярных целевых функций. В связи со спецификой предметной области оптимизационная модель теплоэнергетической системы металлургического комбината может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \overline{Cr}(\overline{X}, V) = \mathbf{B}(\mathbf{V}) \cdot \overline{Z}(\overline{G}, \overline{Y}(\overline{X})) \rightarrow \min, \\ 0 \leq x_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\overline{Cr}(\overline{X}, V)$ – векторная целевая функция; $\mathbf{B}(\mathbf{V})$ – матрица нормализующих коэффициентов; \overline{Z} – вектор критериев верхнего уровня; \overline{G} – вектор постоянных параметров; \overline{Y} – вектор промежуточных переменных; \overline{X} – вектор безразмерных оптимизируемых параметров; V – множество вариантов внешних условий. Скалярные составляющие

векторной целевой функции в виду их громоздкости рассчитываются алгоритмически.

В оптимизационную модель в [7, 8] вошли следующие критерии эффективности теплоэнергетической системы металлургического комбината:

1. Энергетический критерий – приведенный расход привозного условного топлива, потребляемого комбинатом. В условное топливо переводятся два вида внешних (первичных) энергетических ресурса: природный газ и электроэнергия из региональной электросети.

В общем виде его можно записать:

$$Cr_1(\bar{X}) = z_1 + b_{11} \cdot z_2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

2. Экономический критерий – сумма затрат на приведенный расход условного топлива (природный газ и электроэнергия):

$$Cr_2(\bar{X}) = b_{21} \cdot z_1 + b_{22} \cdot z_2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Здесь z_1 и z_2 – годовой расход природного газа и электроэнергии соответственно; b_{11} – средний удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, кг/(кВт·ч); b_{21} – цена на природный газ (грн/т); b_{22} – цена на электроэнергию (грн/(МВт·ч)).

Исходя из современных требований, следует добавить экологический критерий – суммарный объем выбросов (z_j) с учетом их опасности (b_{3j}) [7]:

$$Cr_3(\bar{Z}) = \sum b_{3j} \cdot z_j \rightarrow \min. \quad (4)$$

Предлагаемый подход к оптимизации заключается в поиске для каждого критерия (скалярного компонента векторной целевой функции) наборов относительных параметров, доставляющих минимум каждому критерию. У каждого из критериев этот набор будет в общем случае свой. Далее проводится многокритериальный анализ субоптимальных вариантов, по результатам которого принимается решение о лучшем варианте по совокупности рассмотренных критериев. Поскольку критерии рассчитываются алгоритмически, то в качестве методов оптимизации выбраны поисковые методы. Применение поисковых методов наилучшим образом соответствует современной методологии MBSE исследования и синтеза сложных систем, основанной на моделях и компьютерных экспериментах.

В работе [8] использован метод полного перебора вариантов, который позволяет получить необходимое количество субоптимальных вариантов. На этой основе также можно оценить выигрыш от оп-

тимизации. Для полученных субоптимальных вариантов проведен многокритериальный анализ с использованием интегрированного метода МАИ + ММР в СППР NooTron, что дало возможность обосновать выбор варианта, лучшего по совокупности критериев.

Метод полного перебора является ресурсоёмким – время выполнения оптимизации с уменьшением шага по x_i растёт экспоненциально.

Предлагается добавить экологический критерий к оптимизационной модели, рассмотренной в [8], выполнить оптимизацию с применением метаэвристических методов. Разрабатывается программное средство с возможностью редактирования модели исследуемой системы и выбора метода оптимизации.

Сравнительный анализ технологий металлургии железа с использованием МАИ и НМВС в СППР NooTron

На данный момент существует большое количество технологий металлургии железа, которые используются по всему миру. Первые технологии металлизации железорудного сырья, использующие принципы твердофазного восстановления, были реализованы в шахтных противоточных печах и установках с плотным неподвижным слоем.

При разработке методологии выбора применимых технологий, первым и наиболее существенным шагом является проведение анализа рынка металла. После того, как возможности и проблемы рынка изучены путем проведения технико-экономической оценки каждой возможной технологии и их возможного сочетания, оценки затрат на производство и транспортировку, могут быть выбраны наилучшие технологии для конкретного предприятия [6].

Для анализа технологий было выделено несколько задач:

1) Многокритериальный сравнительный анализ нескольких существующих технологий.

2) Многокритериальная оптимизация выбранных технологий.

3) Сравнительный анализ оптимизированных технологий.

В работе рассматривается первая задача.

Краткая характеристика технологий [6], отобранных для сравнительного анализа:

1. Доменная печь – наиболее отработанная технология производства чугуна, используется на более чем 1000 установках во всем

мире. Мощность доменной печи составляет от 300 – 400 тыс. т год чугуна.

2. Технология COREX – мощность установок составляет от 800 тыс. до 1500 тыс. т/год. В мире работает 5 установок.

3. Технологии MIDREX и HYL на основе газа – много установок работает во всем мире.

4. Технологии MIDREX и HYL на основе угля – используется только одна установка с применением возобновляемого газа, полученного в плавильной печи-газификаторе на основе технологии COREX.

В таблице 1 приведены показатели для этих технологий по критериям, разбитым на две группы: экономические (Э) и технологические (Т) [5, 6].

Таблица 1

Показатели сравниваемых технологий

Критерии		Технологии					Доменная печь
		COREX	HYL + газ	HYL + уголь	MIDREX + газ	MIDREX + уголь	
Э1	Трудозатраты (человеко-час/т продукта)	0,3	0,12	0,2	0,11	0,25	0,1
Э2	Капитальные затраты	12	2	7	1	6	5
Э3	Эксплуатационные затраты	12	6	3	5	2	13
Э4	Термин окупаемости	12	3	9	1	5	8
Т1	Концентрат/окатыши (т/т продукта)	1,5	1,45	1,45	1,45	1,45	1,5
Т2	Кислород, м ³ /т	400	60	280	20	245	30
Т3	Природный газ, ГДж/т	0,1	10,2	0,1	9,9	0,1	0,2
Т4	Электрика, кВт·ч/т	601	60	249	115	284	125

Результаты сравнительного анализа технологий металлургии железа методом анализа иерархий в СППР NooTron приведены в табл.2. В рамках данной задачи приоритеты критериев в каждой (условной) группе приняты равными, при этом важность группы экономических критериев принята выше технологических процессов на небольшой уровень преимущества – «2» по шкале Саати. Приоритеты альтернатив по критериям рассчитаны в шкале отношений при условии «чем меньше, тем лучше».

Результат сравнительного анализа
технологий металлургии железа МАИ

А \ К	Э1 (0,167)	Э2 (0,167)	Э3 (0,167)	Э4 (0,167)	Т1 (0,083)	Т2 (0,083)	Т3 (0,083)	Т4 (0,083)	Гл.Пр.
<i>COREX</i>	0,084	0,040	0,061	0,045	0,163	0,023	0,284	0,039	0,080
<i>HYL + газ</i>	0,210	0,239	0,123	0,180	0,169	0,151	0,003	0,392	0,185
<i>HYL + уголь</i>	0,126	0,068	0,245	0,060	0,169	0,032	0,284	0,094	0,131
<i>MIDREX + газ</i>	0,229	0,478	0,147	0,540	0,169	0,454	0,003	0,204	0,302
<i>MIDREX + уголь</i>	0,101	0,080	0,368	0,108	0,169	0,037	0,284	0,083	0,157
<i>Доменная печь</i>	0,252	0,096	0,057	0,067	0,163	0,303	0,142	0,188	0,145

Обозначения: *А* – альтернативы, *К* – критерии, *Гл.Пр.* – глобальные приоритеты альтернатив, выделенная жирным альтернатива – лучшая по совокупности критериев.

Проведем сравнительный анализ технологий с использованием нелинейного варианта метода взвешенных сумм реализованного в СППР NooTron [1].

Метод взвешенных сумм является одним из основных методов МКА. Он позволяет работать с большим количеством критериев сложной иерархической структуры и большим количеством сравниваемых объектов. В системе поддержки принятия решений NooTron [1] реализовано 3 варианта МВС: классический, интегрированный вариант «МВС + МАИ», метод ранжированных весов критериев. В этих методах используется аддитивная свертка локальных оценок и реализованы средства для расчета весов критериев. Разработанный НМВС включает такие функции свёртывания критериев: линейная свертка (Л), мультипликативная свертка (М), степенная мультипликативная свертка (СМ), дополнительная мультипликативная свертка (ДМ), простая гармоническая свертка (ПГ), взвешенная гармоническая свертка (ВГ). Подробно эти свертки рассмотрены, например, в [9, 10].

Для применения МВС показатели альтернатив должны быть приведены в единую бальную шкалу. Для рассматриваемой задачи была выбрана 100-бальная шкала. Чтобы обеспечить корректную ра-

боту НМВС, необходимо избежать нулевых оценок, поэтому нормировка по Гермейеру [9] здесь не подходит.

С этой целью предлагается подход к переводу натуральных оценок в бальные шкалы на основе расчета локальных приоритетов матрицы парных сравнений объектов в МАИ, предложенного в [11, 12]. При наличии в задаче количественных критериев, оцениваемых в натуральных шкалах, для получения локальных приоритетов в МАИ используют шкалу отношений. При этом, получаемая матрица парных сравнений всегда будет согласованной («матрица относительных весов»), не зависимо от количества альтернатив. Этот вариант МАИ реализован в СППР NooTron.

Для согласованной матрицы парных сравнений приоритеты альтернатив находят по формуле [11]:

$$p_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j}, \quad (5)$$

где a_i – i -тый элемент последнего столбца МПС; n – количество альтернатив.

Элемент матрицы парных сравнений, заполненной по шкале отношений, в столбце n рассчитывается так:

$$a_i = \begin{cases} \frac{u_i}{u_n}, & \text{"чем больше, тем лучше"}; \\ \frac{u_n}{u_i}, & \text{"чем меньше, тем лучше"}, \end{cases} \quad (6)$$

где u_i – оценка i -той альтернативы в натуральной шкале, $u_i > 0$.

Таким образом, формулы (5) и (6) можно применить и для перевода в полярную шкалу «0-1», для этого в формуле (5) следует «нормировку на сумму» заменить на «нормировку на максимум»:

$$p_i = \frac{a_i}{\max_j a_j}. \quad (7)$$

На основе формул (7) и (6) натуральные оценки альтернатив из табл. 1 были переведены в 100-бальную шкалу, а затем применен НМВС. При этом структура критериев была представлена двумя уровнями, что позволило учесть приоритеты групп принятые в рамках задачи. Результат сравнительного анализа технологий металлургии железа НМВС приведен в табл. 3.

Выводы

Предложен подход к многокритериальной оптимизации, основанный на совместном использовании поисковых методов и методов количественного анализа решений. Этот подход позволяет на основе многокритериального анализа субоптимальных вариантов, получаемых с использованием поисковых методов оптимизации для каждого критерия (скалярной целевой функции), принять решение о лучшем варианте по совокупности критериев. Рассмотрено применение этого подхода в двух задачах: распределение внутренних энергетических ресурсов металлургического комбината, сравнительный анализ технологий металлургии железа.

При решении указанных задач использовалась система поддержки принятия решений NooTron [1], которая на данный момент включает 10 методов многокритериального анализа. В СППР NooTron можно провести сравнительный анализ альтернатив с использованием нескольких методов МКА и различных свёрток, на основании чего может быть повышена обоснованность принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система поддержки принятия решений NooTron: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nootron.net.ua>.
2. Катренко А.В. Теорія прийняття рішень / А.В. Катренко, В.В. Пасічник, В.П. Пасько. – К. : видавнична група ВНУ, 2009. – 448 с.
3. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин – М.: Наука, 1982. – 255 с.
4. Скобцов Ю.А. Метаэвристики: монография / Ю.А. Скобцов, Е.Е. Федоров. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2013. – 426 с.
5. Розенгарт Ю.И. Вторичные энергетические ресурсы чёрной металлургии и их использование / Ю.И. Розенгарт, Б.И. Якобсон, З.А. Мурадова. – К.: Вища шк. 1988. – 304 с.
6. Ярошенко Ю.Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособие / Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон, И.Ю. Ходорковская. Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ» 2012. – 670с.
7. Сазанов Б.В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
8. Михальов О.І. Системна модель для багатокритеріального аналізу технологій використання енергетичних ресурсів металургійного виробництва / О.І. Михальов, В.І. Кузнецов, Г.Л. Євтушенко // Сучасні проблеми металургії. – №17. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 50 – 65.
9. Воронин А.Н. Вложенные скалярные свёртки векторного критерия / А.Н. Воронин // Проблемы управления и информатики. – 2003. – №5. – С. 10 – 21.
10. Микони С. В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив : [учеб. пособие] / С. В. Микони. – СПб. : Издательство «Лань», 2009. – 272 с.
11. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Л.Саати. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
12. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев / В. Д. Ногин // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2004. – Т. 44. – №7. – С. 1261 – 1270.