

УДК 629.162.5

В.Г.Зайцев, А.Л.Чайка, А.И.Швачка, И.А.Лукьяненко, Д.В.Пинчук

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЕКТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Постановка задачи

Энергетические проблемы на Украине требуют не только совершенствования и развития новой энергосберегающей техники, технологии и оборудования, но и существенного развития системы управления этими жизненно важными процессам в экономике державы. Это изменяет саму постановку задач прогнозирования, планирования и управления, которые целесообразно рассматривать, как векторные задачи (многокритериальные), для которых поиск лучшего (компромиссного) решения осуществлялся на множестве отдельных показателей (критериев), зачастую противоречивых.

Еще Л. Эйлер [1] указывал на то, что какую бы реальную задачу ни рассматривали рано или поздно приходим к задаче на максимум или минимум.

Математическая формулировка задач классической оптимизации представляет собой

$$f(x) \rightarrow \min$$

при условии $x \in X \subset E_n$, где E_n – n -мерное евклидово пространство.

Постановка задачи в таком виде очень общая. Различные предположения о функции $f(x)$ и области допустимых значений X , позволяют рассматривать вопросы существования решения и методов его определения [2].

Однако, реальные задачи инженерной (технологической) практики и экономики выдвигают задачи, которые в классическую схему не укладываются. Основной чертой таких задач является разумное (рациональное) использование ресурсов.

Насколько рационально используются ресурсы, как правило, оценивается по нескольким показателям $f_i(x), i = \overline{1, k}$, каждый из которых желательно сделать как можно меньшим при заданных ресурсах X .

Формальная запись таких задач представляет собой

$$\begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \dots \\ f_n(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

при условии $x \in X$.

Польза от общей постановки в том, что она позволяет делать задачи оптимизации обозримыми и сформулировать принятие решения. Отметим, что решение задач такого типа неоднозначно.

В математической литературе подобные задачи формулируются с использованием бинарных отношений [3, 4]. Как критерий отбора вариантов для сформулированной задачи используется бинарное отношение Парето. Изучению свойств такого рода задач посвящено множество литературы. Обратим внимание на работы [5 - 8], в которых представлен подробный обзор литературы о задачах векторной оптимизации, методах решения и изучению их свойств. В расчетах использовался метод квазиоптимизации локальных показателей (критериев), который часто называют методом последовательных уступок.

Анализ метода исследования

Метод позволяет осуществлять поиск не единственного точного оптимума, а некоторой области решений, близких к оптимальному, – квазиоптимального множества. При этом уровень допустимого отклонения от точного оптимума определяется с учетом точности модели, используемой при постановке задачи оптимизации, а также некоторых практических соображений (например, технологических требований рассматриваемого процесса). Вначале производится качественный анализ относительной важности критериев. На основании этого анализа показатели располагаются и нумеруются в порядке убывания важности, так что главным считается критерий (или показатель) F_1 , менее важный F_2 , а затем следуют остальные локальные показатели F_3, F_4, \dots, F_m . На первом шаге максимизируется первый по важности показатель F_1 и определяется его наибольшее значение M_1 . Затем назначается допустимое снижение (уступка) $\Delta_1 \geq 0$ показателя F_1 . Далее определяем новую допустимую область $X(1)$, как подобласть X вида

$$X(1) = \{x \in X \mid F_1(x) \geq M_1 - \Delta_1\}$$

Такой подход позволяет значительно сузить первоначальную допустимую область X , когда переходим к следующему по важности критерию.

После этого находим наибольшее значение M_2 второго показателя F_2 на множестве $X(1)$, т. е. при условии, что значение первого показателя должно быть не меньше, чем $M_1 - \Delta_1$. Снова назначается значение уступки $\Delta_2 \geq 0$, но уже по второму показателю, которое вместе с первым используется при нахождении условного максимума третьего показателя, и т.д. На последнем шаге максимизируется последний по важности показатель F_m , при условии, что значение каждого показателя F_i из $m-1$ предыдущих должно быть не меньше соответствующей величины $M_i - \Delta_i$. Полученные таким образом стратегии считаются оптимальными:

$$X(i) = (x \in X(i-1) | F_i(x) \geq M_i - \Delta_i).$$

Таким образом, оптимальной считается всякая стратегия, являющаяся решением последней из следующей последовательности задач:

- 1) найти $M_1 = \sup F_1(x), x \in X$;
- 2) найти $M_2 = \sup F_2(x), x \in X(1)$;
- ...
- m) найти $M_m = \sup F_m(x), x \in X(m-1)$.

Следовательно, если показатель F_m на множестве стратегий, удовлетворяющих ограничениям задачи m) из (*) не достигает своего наибольшего значения M_m , то решением задачи векторной оптимизации считают максимизирующую последовательность $\{x_k\}$ из последовательности множеств

$$X(m-1) \subset X(m-2) \subset \dots \subset X(1) \subset X.$$

Практически подобные максимизирующие последовательности имеет смысл рассматривать и для того случая, когда верхняя грань в задаче m достигается, так как для решения экстремальных задач широко применяются итеративные методы. Алгоритм решения задачи векторной оптимизации имеет следующие шаги.

1. Пусть x_{0_1} — решение задачи (*) $\max F_1(x), x \in X$
2. Пусть x_{0_k} - решение задачи $\max F_k(x), x \in X(k-1)$, где $X(k)$ определяется из (*).
3. Если $k < m$, то изменяем $k = k + 1$ и повторяем шаг 2. Если $k = m$, то x_{0_m} считаем оптимальным решением. Алгоритм закончен.

Значения уступок Δ_i ($i=1, \dots, m$) последовательно назначаются при изучении взаимосвязи частных показателей. Вначале решается вопрос о назначении допустимого снижения Δ_1 первого показателя от наибольшего значения M_1 . Практически для этого задают несколько величин уступок $\Delta_{11}, \Delta_{21}, \Delta_{31} \dots$ и путем решения задачи (*) определяют соответствующие максимальные значения $M_2(\Delta_{11}), M_2(\Delta_{21}), M_2(\Delta_{31}), \dots$ второго показателя. Далее рассматривают пару показателей F_2 и F_3 . Вновь назначают пробные значения уступок $\Delta_{12}, \Delta_{22} \dots$ и, решая задачу (*), отыскивают наибольшие значения $M_3(\Delta_{12}), M_3(\Delta_{22})$. Полученные данные анализируют, назначают Δ_2 , переходят к следующей паре показателей F_2 и F_3 и т. д. Наконец, в результате анализа взаимного влияния показателей F_{m-1} и F_m выбирают значение последней уступки Δ_{m-1} и отыскивают оптимальные стратегии, решая задачу m (*) (обычно ограничиваются нахождением одной такой стратегии).

Таким образом, хотя формально при использовании метода последовательных уступок достаточно решить лишь задачи (*), однако для определения значения уступок с целью выяснения взаимосвязи частных показателей фактически приходится решать существенно большее число таких задач. Для решения задачи векторной оптимизации нужно так ранжировать критерии, чтобы потом удобнее было выбирать значения уступок.

Метод последовательных уступок целесообразно применять для решения тех задач векторной оптимизации, в которых все частные критерии естественным образом упорядочены по степени важности. Каждый показатель настолько существенно более важен, чем последующий, что можно ограничиться учетом только попарной связи показателей и выбирать допустимое снижение очередного критерия с учетом поведения лишь одного следующего показателя. Особенно удобным является случай, когда уже в результате предварительного анализа задачи векторной оптимизации выясняется, что можно допустить уступки лишь в пределах «инженерной, технологической» точности (5 - 40% от наибольшей величины показателя).

Основная часть

Экономико-математическое моделирование доменного процесса [9] позволяет определить оптимальный набор параметров комбинированного дутья, при котором достигается экстремальное

значение одного из технико-экономических показателей работы доменных печей. Для различных технико-экономических показателей оптимальные решения не совпадают между собой: например, максимальная производительность достигается при иных значениях параметров комбинированного дутья, чем минимальный расход кокса или условного топлива [10].

Покажем на примере один из путей выбора оптимальных дутьевых режимов плавки по основным исходным данным для доменной печи объемом 5000 м³ ОАО “Арселор Миттал Кривой Рог”.

ТЕХНИКО - ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВКИ:	
Производительность печи, т/час	392
Внешние потери теплоты от печи, МВт	30
Расход кокса, кг/т чугуна	490
Расход природного газа, м ³ /т чугуна	80
ПАРАМЕТРЫ КОМБИНИРОВАННОГО ДУТЬЯ:	
расход, м ³ /час	0.380Е6
температура дутья, С	1100
содержание кислорода, %	31.0
влажность, г/нм ³	10.0
ПАРАМЕТРЫ ЧУГУНА:	
температура чугуна, С	1500.0
содержание кремния, %	0.82
содержание марганца, %	0.24
содержание углерода, %	4.75
содержание серы, %	0.021
содержание фосфора, %	0.069
ШИХТОВЫЕ УСЛОВИЯ:	
расход рудной части шихты, кг/т чугуна	1740
расход металлодобавки, кг/т чугуна	0
выход шлака, кг/т чугуна	418
Степень окисленности железа в шихте, %	10.0
содержание углерода в коксе, %	87.50

По результатам расчетов показателей плавки, выполненных тепло-энергетическим методом и планированием эксперимента получены полиномы для основных технико-экономических показателей доменной плавки, коэффициенты которых приведены в таблице 1.

Далее в работе рассмотрено, проанализировано и выполнены расчеты для линейной и нелинейной задач векторной оптимизации.

В качестве показателей векторного критерия принято: $F_1(x)$ - максимальная производительность печи, т/ч; $F_2(x)$ - минимальный расход кокса, кг/т чугуна, $F_3(x)$ - минимальный расход условного топлива, кг/т чугуна. Кроме того в расчетах использовались следующие данные: TFZ - температура фурменной зоны, С⁰; TKG -

температура колошникового газа, C^0 ; RD – степень прямого восстановления Fe.

Коэффициенты полиномов имели следующий физический смысл в натуральных или нормированных (условных) единицах:

X1 - температура дутья; $X1=(XX1-1200.)/200.$ - связь между условной X1 и натуральной переменной XX1.

$X2=(XX2-31.)/7.$ - содержание кислорода в дутье;

$X3=(XX3-0.18)/0.128$ - доля углерода природного газа от суммарного количества углерода, сгораемого на фурмах;

$X4=(XX4-0.2)/0.142$ - доля углерода мазута или угольной пыли от суммарного количества углерода, сгораемого на фурмах.

Ограничения технологического типа имеют вид

$2000 \leq TFZ \leq 2300$, здесь TFZ - полином, коэффициенты которого приведены ниже в таблице, а сама функция TFZ – характеризует температуру фурменной зоны печи, которая должна находиться в указанных выше пределах;

$TKG \geq 0$, здесь TKG - полином, коэффициенты которого приведены ниже в таблице, а сама функция TKG – характеризует температуру колошникового газа в печи, которая должна быть выше указанного предела;

$RD \geq 0$, здесь RD - полином, коэффициенты которого приведены ниже в таблице, а сама функция RD – характеризует степень прямого восстановления железа в печи, которая должна быть выше указанного предела;

Ограничения на переменные процесса, после их нормирования, будут находиться в пределах:

$$\begin{aligned} & - 1 \leq x1 \leq 0 \\ & - 1,41 \leq x2 \leq 0 \\ & - 1,41 \leq x3 \leq 1,41 \\ & - 1,41 \leq x4 \leq 1,41 \end{aligned}$$

Таблица 1

Значения коэффициентов расчета полиномов параметров доменной плавки

	св.ч.	x1	x2	x3	x4	x1x1	x2x2	x3x3	x4x4	x1x2
TFZ	2040,0	120,00	122,00	-316,0	-151,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TKG	174,0	-37,10	-86,60	104,00	63,10	0,22	9,36	-4,65	-2,18	5,21
RD	33,0	5,33	-0,423	-17,70	-1,03	-0,32	-0,07	-0,67	-0,05	-1,10
P(F ₁)	386,0	25,70	77,70	-13,60	-4,93	0,178	-0,80	-0,12	-0,05	-0,17
T(F ₃)	611,0	-19,90	8,22	24,20	11,00	1,24	-1,11	1,06	0,303	3,63
K(F ₂)	392,0	-4,11	3,08	-80,00	-51,80	0,269	-0,501	-2,78	-0,67	0,646
C _Σ	328,0	-22,7	7,87	11,8	4,37	1,40	-0,95	0,64	0,226	4,25

x1x3	x1x4	x2x3	x2x4	x3x4
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,384	-0,186	16,60	10,10	-6,13
1,48	0,202	-0,253	0,142	-0,311
0,237	0,259	-2,25	-0,311	-0,187
0,23	0,25	-2,25	-0,32	-0,18
-2,59	-1,24	0,19	-0,277	0,858
5,39	3,52	-1,92	-1,31	-2,89
-1,85	-0,846	-0,211	-0,528	0,476

Показатели (функции) $F_i(x)$, $i=1, 2, 3$, а также ограничения TFZ, TKG и RD имели вид квадратичных полиномов вида –

$$y=b_0+b_1*x_1+b_2*x_2+b_3*x_3+b_4*x_4+b_{11}*x_1^2+b_{22}*x_2^2+b_{33}*x_3^2+b_{44}*x_4^2+b_{12}*x_1*x_2+b_{13}*x_1*x_3+b_{14}*x_1*x_4+b_{23}*x_2*x_3+b_{24}*x_2*x_4+b_{34}*x_3*x_4,$$

их значения коэффициентов приведено в табл.1.

Решение линейной и нелинейной задач векторной оптимизации осуществлялось по тем же алгоритмам, но с учетом коэффициентов при степенях x_1*x_1, \dots, x_3*x_4 . Полученные результаты представлены в таблице № 2.

Таблица 2

Значения показателей плавки при решении задач векторной оптимизации методом последовательный уступок (числитель – линейная, знаменатель – нелинейная)

	Показатели доменной плавки					
	P, т/час	K, кг/т чугу.	T, кг/т чугу.	Δ , %	T _{prov}	ΔT
1 шаг	P _{max} =398/398	429/ 427	593/ 594	0	540/539	-53/-55
2 шаг	386/387	K _{min} =363/363	613/614	5	627/628	14/14
3 шаг	295/289	496/497	T _{min} =566/566	40	550/579	-16/13

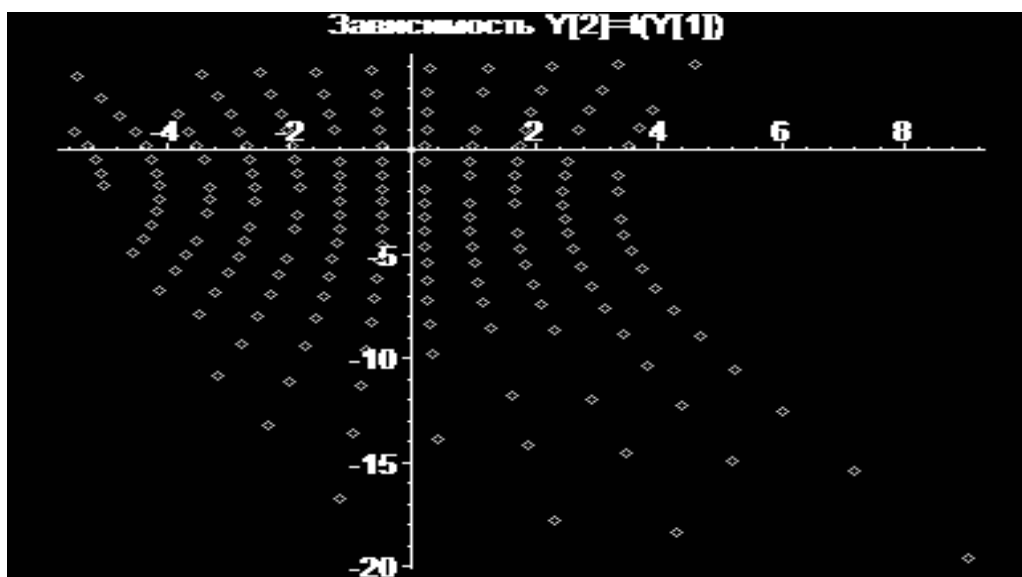


Рисунок 1

Для построения паретовских областей использовалось аналитическое представление конуса Парето и алгоритм предложенный Босовым А.А.[11]. Получена функциональная взаимосвязь между показателями - производительностью печи и расходом кокса, а также расходом кокса и условным топливом, которые представлены на рис. 1 и рис. 2. Отметим, что на рис.1 точка с координатами (0,0) соответствует значениям: производительность печи (ось x) – 386,0 и расходу кокса (ось y) - 392,0. Соответственно, на рис.2 имеем - точка с координатами (0,0) соответствует значениям: расходу кокса (ось x) - 392,0 и расход условного топлива, кг/т чугуна (ось y) – 611,0.

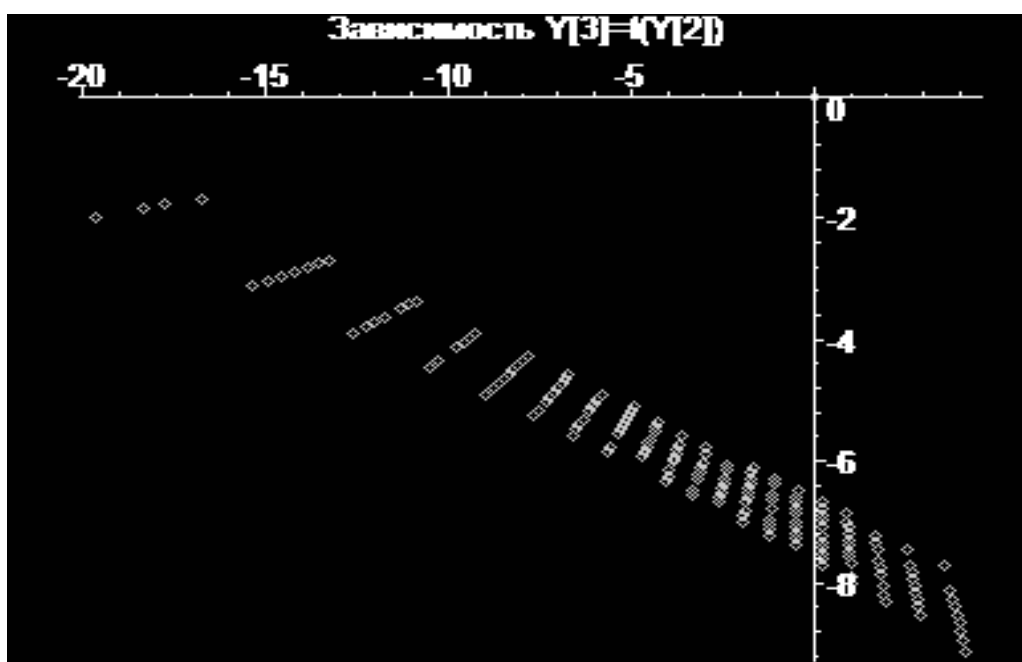


Рисунок 2

Выводы и перспектива дальнейших исследований

Расчитанные наборы параметров комбинированного дутья и соответствующие им технико-экономические показатели существенно отличаются друг от друга. Максимальная производительность печи и минимум расхода кокса достигаются при максимальном нагреве (в нашем примере 1200 °С) и обогащении дутья кислородом до максимальной величины, принятой в ограничениях - 31%. Минимальный расход условного топлива достигается при максимальном в ограничениях нагреве воздушном дутье и минимальном расходе природного газа.

В режиме работы с критерием максимальной производительности печи или минимум расхода условного топлива температура фурменной зоны будет максимальной, а при режиме минимального расхода кокса теоретическая температура фурменной зоны будет минимальной, не нарушающая температурно - тепловой режим плавки. Величина теоретической температуры, как правило, регулируется расходами природного газа, а расход ПУТ приближается к максимальному расходу, данному в ограничениях.

Данный подход будет использоваться при прогнозировании и выборе рациональных температурно – тепловых режимов доменной плавки на печи №9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» и оценки экономичности плавки при применении пылеугольного топлива в условиях ограничения ресурсов природного газа.

Авторы признательны д.т.н. А.В. Бородулину за внимание к работе и ряд ценных замечаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйлер Л. Об определении движения брошенных тел в несопротивляющейся среде методом максимумов и минимумов: Вариационные принципы механики, под ред. Л. С. Полока. – М.: Изво физико-математической литературы, 1959. – С. 31 - 40.
2. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980. – 518 с.
3. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. Теория выбора и принятия решений. – М.: Наука, 1982. – 327 с.
4. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физмат, 2002. – 144 с.
5. Messac, A., Sundararaj, G. J., Tappeta, R. V., and Renaud, J. E., "Ability of Objective Functions to Generate Points on Non-Convex Pareto Frontiers," AIAA Journal, Vol. 38, No. 6, June 2000, pp. 1084 - 1091. <http://www.rpi.edu/~messac/Publications/pareto.pdf>.
6. Messac, A., Melachrinoudis, E., Sukam, C. Aggregate Objective Functions and Pareto Frontiers: Required Relationships and Practical Implications. – Optimization and Engineering Journal, Kluwer Publishers, Vol. 1, Issue 2, June 2000, pp. 171 - 188.
7. Mattson C., Messac A. Pareto Frontier Based Concept Selection Under Uncertainty, with Visualization. Springer – Special Issue on Multidisciplinary Design Optimization, Invited (refereed) Paper, OPTE: Optimization and Engineering, Vol. 6, No. 1, March 2005, pp. 85 - 115.
8. Utyuzhnikov S. V., Fantini P., Guenov M. D. A Method for Generating Well-Distributed Pareto Set in Nonlinear Multiobjective Optimization. – 2005. – 28 p. <http://arxiv.org/abs/math/0512055>.

9. Опыт и проблемы системного анализа использования топлива в доменном производстве/ А.В. Бородулин, В.П. Бородулина, Э.М. Гольдфарб и др. Сталь, 1987, №10, с. 105 – 110
10. О путях оптимизации параметров комбинированного дутья при выплавке чугуна./ Бородулин А.В. Дубина О.В., Лукьяненко И.А., Романенко В.И., Швачка А.И./ - «Пылевидное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна» Труды межд. научно – техн. конференции. Донецк: УНИТЕХ. 2006. с. 193 – 207.
11. Босов А.А. Функции множества и их применение: Дніпродзержинск: ВД “Андрій“, 2007.- 182 с.

Получено 11.03.2008 г.