

А. И. ШВАЧКА, Я. А. ДОВГОПОЛЫЙ, Е. В. ЧЕРНЕЦКИЙ

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ АСУТП ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЧИСЛА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Предлагается метод формирования критерия управления в АСУТП на основании отдельных локальных критериев эффективности (повышение энергоэффективности производства, которое сопровождается ростом производительности) путем достижения компромиссных решений по отдельным показателям производства и формирования базы данных вариантов управления. Сделан вывод о необходимости перехода к глобальному критерию управления в зависимости от текущей энергетической базы и экономической целесообразности, что повышает маневренность и гибкость системы управления в нестабильных современных условиях производства в стране.

Ключевые слова: система регулирования, объект, критерий управления, энергоэффективность, математическая модель, алгоритм, компромиссные решения, устойчивость, база данных, информационное обеспечение.

Введение. Отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие производства, решение проблем качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке требует коренного совершенствования систем сбора, хранения, обработки, передачи и использования информации [1].

Современные тенденции развития производства характеризуются разработкой, внедрением и использованием информационных технологий. Их основой являются компьютеры и компьютерные сети, имеющие богатейшее программное обеспечение, а также системы управления базами данных, компьютерные системы поддержки принятия решений, программные продукты, обладающие широкими функциональными возможностями и развитым пользовательским интерфейсом.

Одним из важнейших условий создания эффективных систем управления является совершенствование математических моделей, которые позволяют получить информацию о процессах в агрегатах, осуществлять оптимизацию их параметров, разрабатывать и совершенствовать алгоритмы управления техническими системами [1].

Анализ основных достижений и литературы.

При управлении в технических системах имеется несколько показателей оценки эффективности. Помимо наиболее распространенного экономического критерия, могут быть важными энергетические, экологические и др. факторы. Они учитываются обычно путем введения ограничений. Это имеет достаточно серьезные основания, так как удовлетворение других (неэкономических) требований практически всегда связано с дополнительными затратами. При этом экономический критерий выступает как обобщающий, позволяющий сопоставлять варианты решений при обеспечении требуемых уровней соблюдения остальных критериев. Учет свойства многокритериальности при управлении отражается как на применяемых математических моделях и методах, так и на общей методологии управления.

Процедура основных информационных технологий последовательно проиллюстрирована на примере доменного производства. Это обусловлено тем, что это производство является основным, наиболее сложным, энерго- и ресурсоемким.

Энергетические проблемы на Украине изменяют

постановку задач прогнозирования, планирования и управления, которые целесообразно рассматривать, как векторные задачи (многокритериальные), для которых поиск лучшего (компромиссного) решения осуществлялся на множестве отдельных показателей, зачастую противоречивых [2]. Существуют определенные исторические предпосылки развития многокритериальных задач (табл. 1).

Таблица 1 – Тенденции формирования задачи множественного выбора в металлургии чугуна

Автор	Основные положения теории
М. Курако	- повышение производительности - снижение расхода кокса - снижение трудоемкости
В. Гулыга	- повышение производительности - снижение расхода топлива - механизация производства
Л. Фортунато	- повышение производительности, - снижение расхода горючего, - снижение себестоимости продукции

В металлургической теплотехнике работы в данном направлении выполнены И.Д. Семикиным, Э.М. Гольдфарбом и их последователями и учениками: Г.И. Деминым, И.Г. Товаровским, А.В. Бородулиным, Т.И. Сламчинской, В.П. Бородулиной и др. Особенностью их решения является сведение задачи к однокритериальной на основании теории игр, установлении приоритета критериев на основании весовых коэффициентов и др.

Академик Моисеев Н.Н. отмечает [3], что работы в области методов принятия решений требуют создание не только специального математического обеспечения, но и развития знаний, позволяющих выяснить истинную структуру интересов субъектов.

В отношении методологии управления важно то, что методы многокритериальной оптимизации предполагают активное участие людей в решении задач [4]. Наличие нескольких критериев создает неопределенность целей управления. Раскрытие этой неопределенности возможно только с участием человека. Конкретно это могут быть экспертные оценки при соизмерении критериев разной природы, оценки допустимости компромиссов. Поэтому благодаря свойству многокритериальности существенно повышается роль человека в управлении

технічними системами.

Аналіз літературних джерел показав, що для підвищення ефективності управління і планування виробництва цілорозумно розширювати шляхи і методи оптимального управління на множині окремих показувачів.

Задачі і методи дослідження. Встановити закономірності і дати кількісну оцінку критеріїв управління технічної системи з урахуванням можливості отримання максимальних ефектів по основним показувачам процесу при спільному використанні різних видів енергетичних ресурсів методами векторної оптимізації.

Результати численного моделювання. В результаті проведеного численного експерименту розроблена оптимізаційна модель топливоиспользования доменной плавки как задача непрерывно-дискретного программирования. В основу построения модели положены многофакторные нелинейные характеристики показателей плавки, полученные методом планирования эксперимента по модели И. Д. Семикина [5]:

$$P, K, T_{\text{усл}} = f(t_{\text{дм}}, O_2, m, n), \quad (1)$$

где $t_{\text{дм}}$ – температура дутья, °C; O_2 – содержание кислорода в дутье, %; m (n) – доля углерода природного газа (пылеугольного топлива) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах, д.е.; K – удельный расход кокса, кг/т чугуна; P – производительность, т чугуна/час; $T_{\text{усл}}$ – удельный расход условного топлива, кг/т чугуна.

Адекватность полученной модели топливоиспользования и значимость коэффициентов регрессии определены сопоставлением расчетных и практических данных, а также с помощью статистического анализа, задаваясь ошибкой расчета экспериментов по расчетной модели.

В металлургическом производстве основные технико-экономические показатели работы доменной печи должны быть на уровне близком к оптимальному. Т.е., рациональные решения, полученные по отношению к отдельному показателю необходимо скомбинировать в компромиссные, по отношению к отдельному показателю. Причем, потери по отношению к каждому показателю должны быть минимальными.

Математический аппарат решения задачи основан на принципе Парето путем последовательного попарного сравнения элементов в соответствии с правилом предпочтения. Для обхода точек конкурирующих решений использовано понятие «конуса» [6]. Это позволяет оценить не единственное решение, а совокупность равноправных решений рациональных в том или ином смысле.

Практическая целесообразность совместного рассмотрения основных показателей плавки в задаче векторной оптимизации заключается в возможности повышения производительности доменной плавки при одновременном снижении затрат по коксу и топливу. Это определяет постановку задачи в области поиска

«производительность – удельный расход кокса – удельный расход условного топлива»:

$$(-P, K, T_{\text{усл}}) \rightarrow \min \quad (2)$$

Превышение количества параметров поиска более двух, для которых необходимо оценить компромиссные решения, определяет множество решений в виде поверхности в пространстве. Это усложняет анализ полученных результатов, поэтому, решение перенесено на плоскость искомых величин (рис. 1). Статистическая обработка полученных результатов свидетельствует о том, что повышение производительности доменной печи сопровождается увеличением потребления кокса и снижением расхода условного топлива. Вариант принимаемого решения должен быть определен на основании компромисса повышения производительности и связанного с ним повышения затрат на производство.

Формирование критерия управления тепловым режимом плавки в целом может быть выполнено на основании анализа соотношения используемых видов энергоресурсов с дальнейшим переходом на показатель производительности печи.

В данной системе используется следующие виды топлива: кокс, условное топливо. В свою очередь условное топливо объединяет такие виды топливных добавок как пылеугольное топливо и природный газ. Точки вариантов дутьевого режима (рис. 2) расположенные вблизи оси отражающей изменение расхода условного топлива характеризуются повышенными значениями расходов угольной пыли и природного газа. Смещение точек вблизи оси изменения расхода кокса (нижняя часть аппроксимирующей кривой) связано со снижением потребления указанных видов топливных добавок, в частности, расход природного газа и доходит до нулевой отметки, расход угольной пыли сохраняется на уровне 90 кг/т чугуна при сохранении динамики роста содержания кислорода в дутье (21-31 %).

Основная часть точек решений характеризуется использованием дутья с максимальной температурой в ограничениях, т.е. 1200 °C. Эти точки преимущественно расположены под аппроксимирующей кривой и объединены в небольшие группы, главным образом, связанные повышением содержания кислорода в дутье при перераспределении состава топливных добавок. В верхнем диапазоне преимущественно отражены точки с более низкими значениями температуры: 1000, 1100 °C, но более высоким потреблением угольной пыли и природного газа. Наиболее высокие значения расхода топливных добавок: расход природного газа 118 м³/т чугуна при расходе пылеугольного топлива 103 кг/т чугуна. Указанные показатели по затратам угольной пыли соответствуют требуемым в отрасли.

Полученное множество решений задачи векторной оптимизации в области трех показателей доменной плавки вносит дополнительную неопределенность в выборе критерия реализации технологического режима.



Рис. 1 – Характеристики решения задачи поиска компромиссных решений в области «производительность- удельный расход кокса – удельный расход условного топлива»:
 о- удельный расход условного топлива, ■- производительность, ◇- удельный расход кокса, (—) – линия тенденций показателей плавки, (- - -)оценка варианта теплового режима

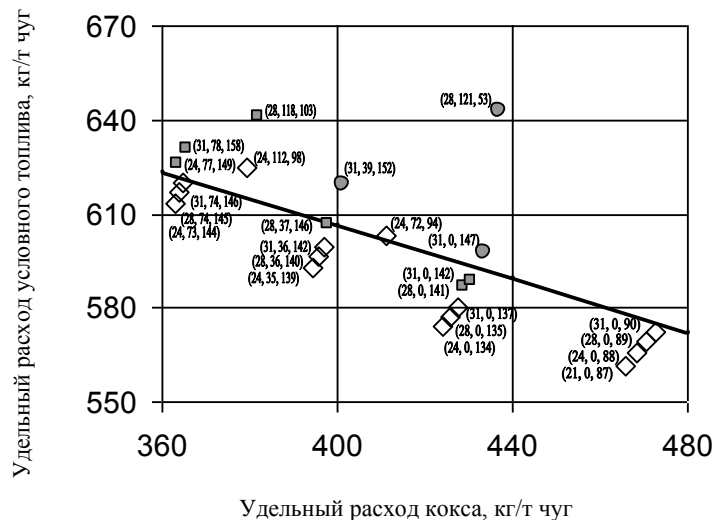


Рис. 2 – Решение задачи векторной оптимизации в области «К-Р-Т_{вкл}»
 на плоскости параметров «удельный расход кокса– удельный расход условного топлива»:
 (—) – аппроксимирующая кривая, $R^2 = 0,699$; результаты исследования при температуре дутья
 (◇- 1200 °C; ●- 1100 °C; ■- 1000 °C); в скобках указаны характеристики дутья (содержание кислорода в дутье, %;
 расход природного газа, м³/т чугуна; расход угольной пыли, кг/т чугуна)

Однако в результате получен массив точек решений, каждая из которых определяет заданный технологический режим, реализация которой связана с определенными показателями энергоиспользования. Сформированная таким образом база данных (степень ее детализации определяется шагом поиска каждой независимой переменной) позволяет оценить затраты ресурсов, которые будут иметь место при наращивании объемов производства или поддержание нормативной мощности в случае отсутствия спроса на продукцию.

Оперативный персонал, имеющий в своем распоряжении подобный инструмент многокритериального поиска для формирования критерия управления, необходимо обеспечить

алгоритмом перехода к единичному решению. В этом отношении одним из возможных подходов является формирование глобального критерия оптимизации в полученных вариантах решения. В современных экономических условиях, связанных с ограниченными возможностями по обеспечению производства энергоносителями или, в результате разрыва традиционных источников их поставки, прекращение их подачи, таким критерием является минимизация энергопотребления.

Проведен анализ вариантов решения в области параметра усвоенной тепловой мощности, определенного как критерий интенсификации режима доменной плавки. Усвоенная тепловая мощность является основной энергетической характеристикой

печи, определяющая количество теплоты, которое получают изделия в печи в единицу времени. Ее значение определяется спецификой сжигания топлива и процессами восстановления. Критерий управления, в рассматриваемой задаче определяет средний, по затратам энергии, технологический режим. Для обеспечения производительности доменной печи 402 т чугуна/час потребовалось подать кокса 364 кг/т чугуна, условного топлива – 617 кг/т чугуна (рис. 1). Несмотря на то, что получены более высокие показатели производства (440 т чугуна/час), режим который им соответствует, не принят для реализации при управлении. Выполнив сравнение принятого режима и максимально возможного, установлено, что повышение производительности на $\approx 5\%$ будет сопровождаться повышением потребления кокса более чем на 50%. Полученные данные согласуются с анализом характеристики энергоиспользования (рис. 2).

Реализация предложенного алгоритма многокритериального поиска для формирования критерия управления, в составе современной АСУТП, позволяет расширить информационно-аналитическую базу принятия научно обоснованных решений по оценке технологического режима, обеспечивает широкий выбор дополнительных аналитических возможностей, высокоразвитую гибкую структуру и высокоэффективный человеко-машинный интерфейс.

Выводы. В результате выполненных исследований решена актуальная научно-техническая задача обоснования рекомендаций по выбору базового технологического режима, определяемого критерием управления, которые отвечают требованиям обеспечения процесса энергетическими ресурсами с учетом их наличия и объемов на основании синтеза результатов компьютерного моделирования и методологии вычислительного эксперимента. Метод отличается учетом взаимного влияния решений при наличии нескольких критериев эффективности с учетом минимальных потерь по отношению к каждому из них, а также принято решение о необходимости перехода к глобальному критерию

управления. Оценка варианта решения представлена в плоскости критерия интенсификации процесса.

Список литературы: 1. Онорин О. П. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О. П. Онорин, Н. А. Спири, В. Л. Терентьев, Л. Ю. Гилева, В. Ю. Рыболовлев, И. Е. Косаченко, В. В. Лавров, А. В. Терентьев. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с. 2. Бородулин А. В. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Суцев. – Днепропетровск, 2006. – 450 с. 3. Моисеев Н. Н. Междисциплинарные исследования глобальных проблем / Н. Н. Моисеев. – Москва: Тайдекс Ко, 2006. – 264 с. 4. Ногин В. Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 98–112. 5. Бородулин А. В. Вопросы системной надежности доменного производства / А. В. Бородулин, А. Л. Чайка, А. А. Сохатский, Б. В. Корнилов, А. И. Швачка // Сб. ИЧМ НАНУ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – № 25. – С. 51–68. 6. Швачка А. И. Развитие информационных технологий в задаче экономико-математического моделирования методами векторной оптимизации / А. И. Швачка, Е. В. Лещенко, О. Ю. Олейник // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 5. – С. 190–193.

References: 1. Honorine O. P., Spirin N. A., Terentyev V. L., Gileva L. Y., Rybolovlev V. Y., Kosachenko I. E., Lavrov V. V., Terentyev A. V. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo processa* [Computer modeling techniques blast furnace]. Ekaterinburg, Ural State Technical University - UPI, 2005. 301 p. 2. Borodulin A. V., Gorbunov A. D., Romanenko V. I., Sushchev S. P. *Domna v jenergeticheskom izmerenii* [Domna in the energy measurement]. Dneprodzerzhinsk, 2006. 450 p. 3. Moiseev N. N. *Mezhdisciplinarnye issledovaniya global'nyh problem* [Interdisciplinary studies of global problems]. Taydeks Co., 2006. 264 p. 4. Nogin V. D. Problema suzheniya mnozhestva Pareto: podhody k resheniju [Pareto set constriction problem: approaches to solving]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatye reshenij* [Artificial intelligence and decision-making]. 2008, no. 1, P. 98–112. 5. Borodulin A. V., Chaika A. L., Sokhatsky A. A., Kornilov B. V., Shvachka A. I. *Voprosy sistemnoj nadezhnosti domennogo proizvodstva* [Questions system reliability blast furnace]. *Sb. IChM NANU. Fundamental'nye i prikladnye problemmy chernoj metallurgii* [Coll. HMI NASU. Fundamental and applied problemmy ferrous metallurgy]. 2012, no. 25, P. 51–68. 6. Shvachka A. I., Leshchenko E. V., Olejnik O. Y. *Razvitie informacionnyh tehnologij v zadache jekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya metodami vektornoj optimizacii* [Development of information technologies in the problem of economic and mathematical methods of vector optimization modeling]. *Voprosy himii i himicheskoy tehnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2013, no. 5, P. 190–193.

Поступила (received) 03.03.2016

Швачка Александр Иванович – кандидат технических наук, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (067) 760-16-45, e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com.

Shvachka Alexander Ivanovich - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", teacher of "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (067) 760-16-45, e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com.

Довгопольный Ярослав Александрович – аспирант, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (093) 090-85-32, e-mail: Yaroslav.Dovgopolyi@gmail.com.

Dovgopolyi Yaroslav Alexandrovich - post-graduate student, PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", teacher of "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (093) 090-85-32, e-mail: Yaroslav.Dovgopolyi@gmail.com.

Чернецкий Евгений Вячеславович – кандидат технических наук, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», доцент кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (067) 950-80-03, e-mail: Evgeniy.Cherneckiy@gmail.com.

Cherneckii Eugene Vycheslavovich - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", Associate Professor of the Department "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (067) 950-80-03, e-mail: Evgeniy.Cherneckiy@gmail.com