



Оригинальная статья

УДК 681.5.017

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-437-446

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2327>

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРЕЦЕДЕНТОВ

С. М. Кулаков, Р. С. Койнов, М. В. Ляховец, Е. Н. Тараборина

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача человеко-машинного управления сложными технологическими агрегатами и комплексами, которые характеризуются большим разнообразием состояний, многомерностью, изменчивостью, неопределенностью. К числу таких агрегатов в черной металлургии относятся коксовые батареи, доменные печи, сталеплавильные агрегаты (дуговые печи, кислородные конвертеры), литейно-прокатные комплексы, прокатные станы, основные цехи и производства. Показана недостаточная для XXI-го в. эффективность модельного подхода к созданию систем управления такими объектами. Рассмотрены альтернативные подходы, основанные на концепции лучших практик. В частности, к ним относятся натурно-модельный и натурный подходы к разработке систем поддержки и принятия управляющих решений. Представлены известные натурно-модельные процедуры применения лучших практик (методы типопредставительных ситуаций и образцовых технологических циклов). Для систем управления технологическими процессами предложен новый (прецедентный) метод автоматизированного выбора и реализации управляющих воздействий с участием операторов-технологов. Разработан модифицированный прецедентный цикл (CBR-цикл) выбора управлений и соответствующая функциональная схема системы программного управления технологическим агрегатом циклического действия. Усовершенствованный прецедентный CBR-цикл включает следующие дополнительные операции: коррекция управляющих решений для отобранных прецедентов; ретроспективная оптимизация реализованных управляющих решений; сохранение не только лучших и оптимизированных, но и ошибочных решений; актуализация базы прецедентов; формирование решений в уникальных или ранее не зафиксированных ситуациях. Сформирована структура информационной модели прецедента на примере программного управления плавкой стали в условиях кислородно-конвертерного цеха, включающая данные о конкретной ситуации в системе управления, параметры выбранных управляющих воздействий и полученные результаты плавки стали. Разработан пример формирования программы управления процессом подготовки и выполнения предстоящей плавкой стали на основе данных предварительно выбранной плавки-прецедента в условиях современного кислородно-конвертерного цеха.

Ключевые слова: автоматизированное управление, сложные технологические объекты, модельный подход, натурно-модельный подход, метод прецедентов, CBR-цикл принятия решений, информационная модель прецедента, плавка, программа управления, коррекция

Для цитирования: Кулаков С.М., Койнов Р.С., Ляховец М.В., Тараборина Е.Н. Автоматизированное управление сложными металлургическими агрегатами на основе метода прецедентов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 437–446.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-437-446>

Original article

AUTOMATED CONTROL OF COMPLEX METALLURGICAL UNITS BASED ON THE CBR METHOD

S. M. Kulakov, R. S. Koinov, M. V. Lyakhovets, E. N. Taraborina

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The paper considers the actual problem of human-machine control of complex technological units and complexes, which are characterized by a large variety of states, multidimensionality, variability, and uncertainty. Such units in the ferrous metallurgy include coke batteries, blast furnaces, steelmaking units (arc furnaces, oxygen converters), foundry and rolling complexes, rolling mills, main workshops and production facilities. The effectiveness of the model approach to the creation of control systems for such objects is shown to be insufficient for the XXI century. Alternative approaches based on the concept of best reasoning (CBR) are considered. In particular, they include full-scale model and full-scale approaches to the development of support systems and management decision-making. The well-known full-scale model procedures for applying the best reasoning (methods of typical situations and exemplary technological cycles) are presented. The authors propose a new CBR method of automated selection and implementation of control actions with the participation of process operators for process control systems. A modified CBR-cycle of control selection and the corresponding functional scheme of the software control system for a cyclic technological unit were developed. The improved CBR-cycle includes the following additional operations: correction of control decisions for selected cases; retrospective optimization of implemented control

decisions; preservation of not only the best and optimized, but also erroneous decisions; updating of the case base; formation of solutions in unique or previously unreported situations. The structure of the case information model is formed on the example of software control of steel melting in the conditions of an oxygen converter shop. It includes three sections: data on the specific situation in the control system, parameters of the selected control actions, and results of steel melting. An example of the control program formation for the preparation and execution of the upcoming steel melting is based on the data of a pre-selected melting case in the conditions of a modern oxygen converter process.

Keywords: automated control, complex technological objects, model approach, full-scale model approach, CBR method, CBR-based decision-making cycle, CBR information model, steel melting in oxygen converter, control program for upcoming melting, correction of CBR control decisions

For citation: Kulakov S.M., Koinov R.S., Lyakhovets M.V., Taraborina E.N. Automated control of complex metallurgical units based on the CBR method. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 437–446. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-437-446>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема автоматизированного управления сложными металлургическими агрегатами (СМА) (электро-сталеплавильные печи, кислородные конвертеры, агрегаты «печь-ковш», коксовые батареи, доменные печи, ферросплавные печи, литейно-прокатные комплексы и другие технологические объекты) не может быть признана эффективно решенной в рамках традиционного (модельного) подхода. Сложность, нестационарность и большое разнообразие состояний СМА, в сочетании с недостаточной точностью математических моделей каналов управления и влияния контролируемых возмущений побуждают искать другие подходы к принятию управляющих решений. В частности, целесообразно обратиться к модификации и алгоритмизации широко известной концепции «лучших практик» применительно к практикам управления СМА. В настоящей работе выполнен краткий анализ традиционного (модельного) подхода к построению автоматизированных управляющих систем и более подробно представлен подход к алгоритмизации накопления и ситуационного применения опыта управления СМА, основанный на методе прецедентов.

МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Отличительной особенностью классического метода синтеза алгоритма управления с обратной связью является использование математической модели управляющих каналов объекта, а также модели влияния приведенного неконтролируемого возмущения. В простом случае структура алгоритма выбирается из числа типовых (П – пропорциональный, ПИ – пропорционально-интегральный, ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный и др.), а его настройки определяются на основе эмпирических формул или посредством решения задачи оптимизации по критерию минимальной дисперсии ошибок регулирования [1].

Более сложными по сравнению с вышеназванными алгоритмами автоматического управления (САУ) являются так называемые системы APC (*Advanced Process Control*), то есть системы усовершенствованного управ-

ления многомерными технологическими объектами, главным компонентом которых является прогнозирующая модель объекта и алгоритмы прогнозирующего управления (*Model Predictive Control* – MPC) [2, 3]. Они нашли широкое применение на нефтеперерабатывающих, химических, целлюлозно-бумажных и других предприятиях мира. Схема системы управления с прогнозирующей моделью показана на рис. 1 (U^d , Y^d , W_k^d , W_{nk}^d и S^d – действительные управляющие, выходные, контролируемые, неконтролируемые возмущающие воздействия (возмущения) объекта управления и его состояния; U^n , Y^n , W_k^n и S^n – натурные сигналы управления, выходные сигналы объекта, сигналы контролируемых возмущений и состояний объекта; U^m и Y^m – модельные сигналы управления и выходные сигналы объекта; Y^* и O^* – заданные значения выходных воздействий объекта и ограничений на управления; Q и O – целевые функции и ограничения оптимизатора; $E = (Y^n - Y^m)$ – вектор ошибок прогнозирования).

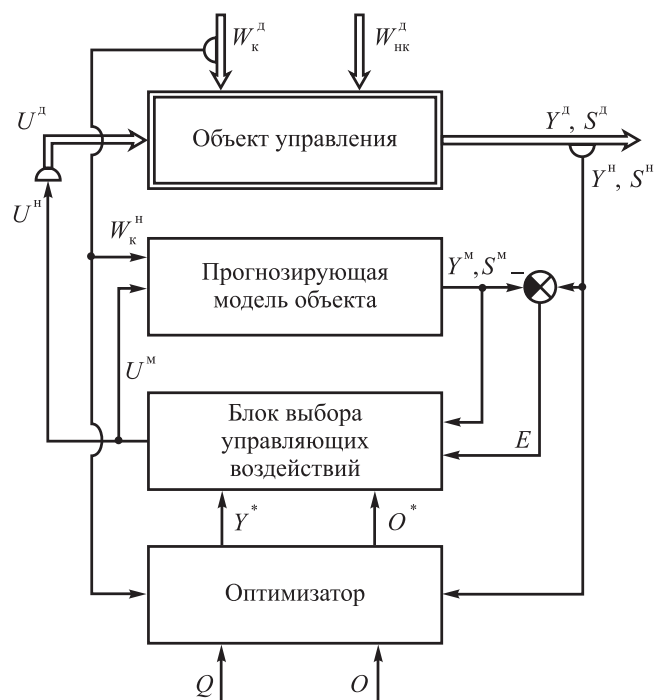


Рис. 1. Общая схема системы управления технологическим объектом с прогнозирующей моделью

Fig. 1. General scheme of control system of technological object with a predictive model

По отношению к ПИД-регуляторам МРС дают на указанных предприятиях эффект 0,5 – 5,0 млн долларов на одну установку в год [3]. Алгоритм выбора управляющих воздействий использует численную оптимизацию для отыскания управлений U^H на горизонте управления с использованием прогнозов Y^M на интервале динамической памяти объекта.

Рассмотренные эффективные для своего класса объектов структуры систем автоматизированного управления технологическими объектами характеризуются неявным [1] или явным [2 – 4] использованием функциональной или физико-химической моделей объекта управления, которая сохраняет адекватность длительное время или может быть своевременно обновлена (при существенном изменении свойств объекта) с помощью встроенной в управляющую систему подсистемы идентификации. Такие системы малоэффективны для сложных плохо формализуемых технологических объектов с изменяющимися свойствами, в том числе для вышеперечисленных металлургических агрегатов и производственных комплексов. Для них целесообразно создавать системы управления, основанные не на модельном, а на натурно-модельном и (или) натурном подходах к управлению [5].

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАТУРНО-МОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СМА

В работах [6, 7] предложено осуществлять накопление и использование опыта прогнозирования и принятия решений в системах управления в виде множества типопредставительных ситуаций (ТПС). При этом под ТПС понимается взаимосвязанная совокупность структуры, информационного отображения объекта, внешних и внутренних условий его функционирования, параметров каналов управления и контролируемых внешних воздействий, реализаций приведенных возмущающих воздействий, критериев эффективности управления. Конечное множество ТПС рассматривается в качестве натурно-модельного блока, на основе которого принимаются управляющие решения и (или) прогнозы. В системе прогнозирующего управления коксохимическим производством металлургического комбината используется более 50 ТПС [7].

Применение метода ТПС подробно представлено в работе [7], которая является наглядным примером управления сложным производственным комплексом.

Еще одним примером использования натурно-модельного подхода является применение метода управления по образцовым циклам, а именно – управление плавкой стали в кислородном конвертере [8, 9]. Все плавки стали разделены на классы в зависимости от значений их входных и выходных переменных. Классификация плавки стали предполагает использование следующих параметров: содержание кремния, марганца, фосфора, серы в жидком чугуна; температура

и масса жидкого чугуна; содержание углерода, фосфора, серы в стали; температура стали; основность шлака; минутный расход дутья; положение продувочной фурмы. Диапазон значений каждой из названных переменных разбит на несколько (до пяти) поддиапазонов. Такому разбиению соответствует не более 65-ти классов, для каждого из которых выбрана образцовая плавка. Если входные и заданные выходные значения переменных предстоящей плавки совпадают с одним из классов и соответствующей образцовой плавкой, информация о параметрах которой хранится в базе данных, то значения управляющих воздействий для предстоящей плавки принимаются такими же, как в образцовой плавке.

Рассматриваемый метод в своей основе аналогичен методу принятия управленческих решений по типопредставительным ситуациям, но в нем не предполагается оперативная корректировка управлений с применением пересчетной модели (модели объекта «в малом»), и является примером натурального подхода к управлению СМА, к числу которых относится процесс выплавки стали в конвертере.

ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПЫТА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СМА

Суть метода принятия решений на основе прецедентов широко известна и наглядно отображается так называемым CBR-циклом принятия решений [10 – 17]. Вместе с тем алгоритмические основы прецедентного подхода к принятию управленческих решений в автоматизированных (человеко-машинных) системах управления технологическими процессами находятся пока еще на начальном этапе своего развития [5, 18 – 20].

Прежде всего необходимо модифицировать CBR-цикл принятия решений, рассматривая его как цикл выработки управляющих воздействий на основе информации о текущей ситуации в системе управления (о внешних воздействиях, параметрах состояния агрегата, выходных воздействиях, прошлых и текущих управлениях, цели управления и ограничениях). На рис. 2 показан такой модифицированный цикл выработки управляющих воздействий на основе прецедентов, включающий действия лица, принимающего решения (ЛПР) (оператора-технолога, мастера, начальника смены, диспетчера).

Актуальными задачами, связанными с реализацией модифицированного CBR-цикла применительно к СМА, являются разработка функциональной схемы системы управления СМА; построение информационной модели прецедента; выбор наилучшего (оптимального) прецедента из множества актуальных. На примере разработки программы управления предстоящей плавкой стали в кислородном конвертере, включающей

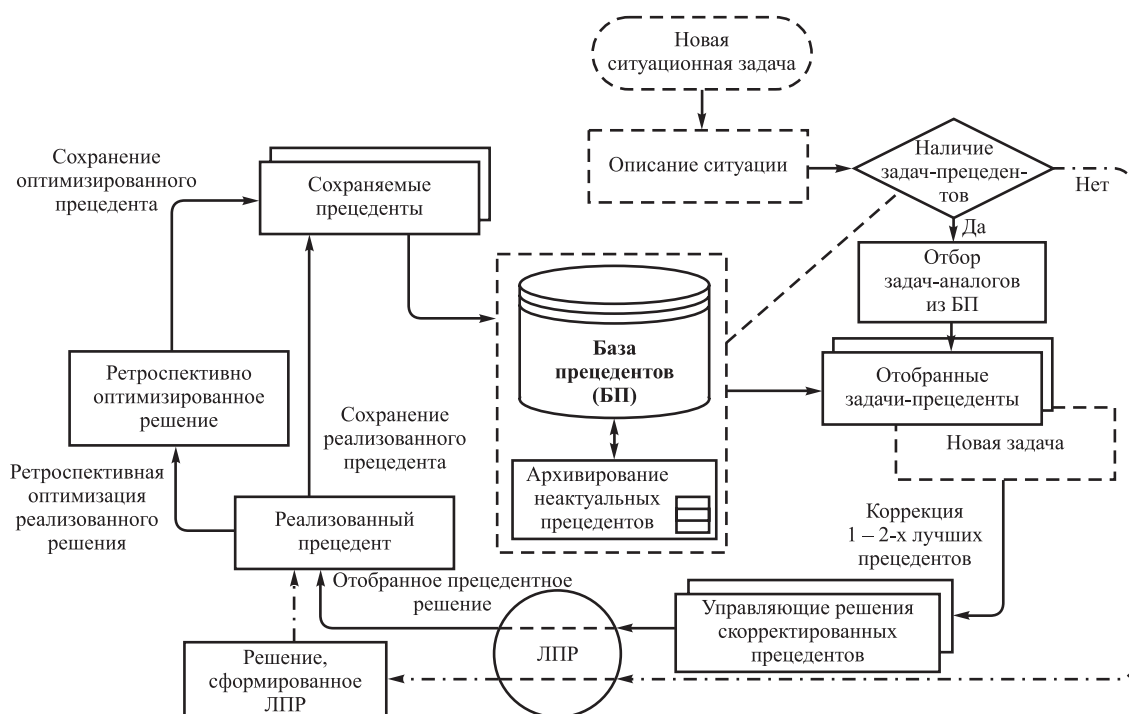


Рис. 2. Модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений применительно к системе управления СМА

Fig. 2. Modified cycle of development and implementation of control solutions in relation to CMU control system

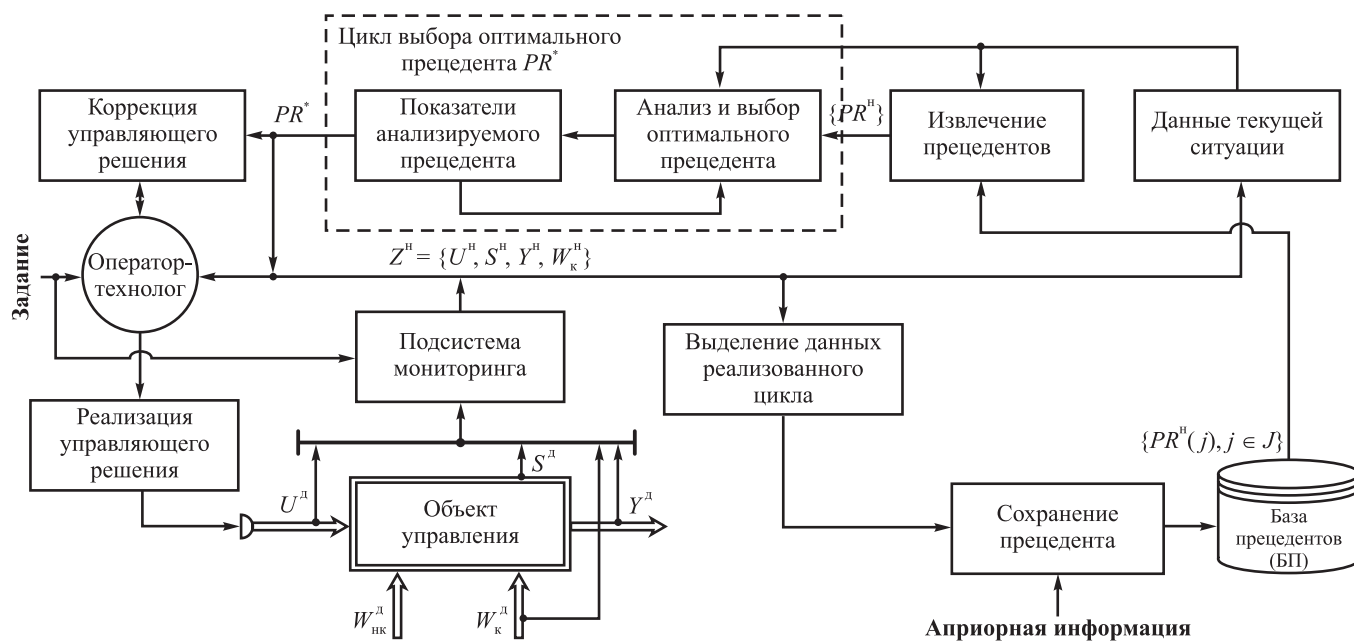


Рис. 3. Схема системы прецедентного управления СМА циклического действия

Fig. 3. Scheme of CBR-based control system of cyclic CMU

количество и моменты подачи шихтовых материалов, расхода дутья и положение продувочной фурмы, массу и ритм подачи шлакообразующих, температуру расплава, разработаны общая схема системы управления (рис. 3, $\{PR^n\}$ – извлеченные натурные прецеденты; $Z^n = \{U^n, S^n, Y^n, W_k^n\}$ – вектор натуральных данных; PR^* и $\{PR^n(j), j \in J\}$ – оптимальный прецедент и множест-

во натурных прецедентов, данные которых сохранены в БП) и структура информационной модели прецедента (рис. 4).

В таблице представлен пример применения метода прецедентов для определения параметров программы управления предстоящей плавкой стали в кислородном конвертере.

Приведены данные плавки-прецедента, которая по времени выполнения отстоит от предстоящей плавки менее чем на сутки и совпадает с ней по заданной марке стали. В таблице показаны фактические данные о химическом составе чугуна, длительности межплавочного простоя предстоящей плавки, а также планируемые (на базе прецедента) параметры. Для сравнения приведены фактические значения параметров шихтовки и ведения плавки технологами цеха, которые не имели возможности учитывать рекомендуемую программу управления рассматриваемой плавкой. Вследствие последнего фактически реализованная программа ведения плавки имеет следующие недостатки:

- плавка проведена с додувкой продолжительностью 1 мин 44 с;
- температура металла по окончании плавки (1536 °C) существенно ниже нормы (не менее 1600 °C);
- основность (2,3) шлака существенно ниже нормы (2,5).

При формировании программы на основе плавки-прецедента некоторые параметры прецедента были скорректированы с учетом исключения додувки (длительностью 1 мин 7 с) и компенсации значительного межплавочного простоя (продолжительностью 26 мин 56 с). Измененные значения параметров отмечены звездочкой.

Длительность продувки $T_{\text{пд}}$ и расход кислорода $V(\text{O}_2)_{\text{пд}}$ на продувку корректировали с учетом продолжительности додувки $T_{\text{дд}}$ и расхода кислорода $V(\text{O}_2)_{\text{дд}}$ на додувку:

$$T_{\text{пд}}^* = T_{\text{пд}} + T_{\text{дд}}; \quad V^*(\text{O}_2) = V(\text{O}_2)_{\text{пд}} + V(\text{O}_2)_{\text{дд}}. \quad (1)$$

Расход угля $G_{\text{у}}$ и кислорода $V(\text{O}_2)_{\text{пр}}$ на подогрев металлолома (для компенсации межплавочного простоя $\tau_{\text{мп}}$ конвертера) корректировались следующим образом:

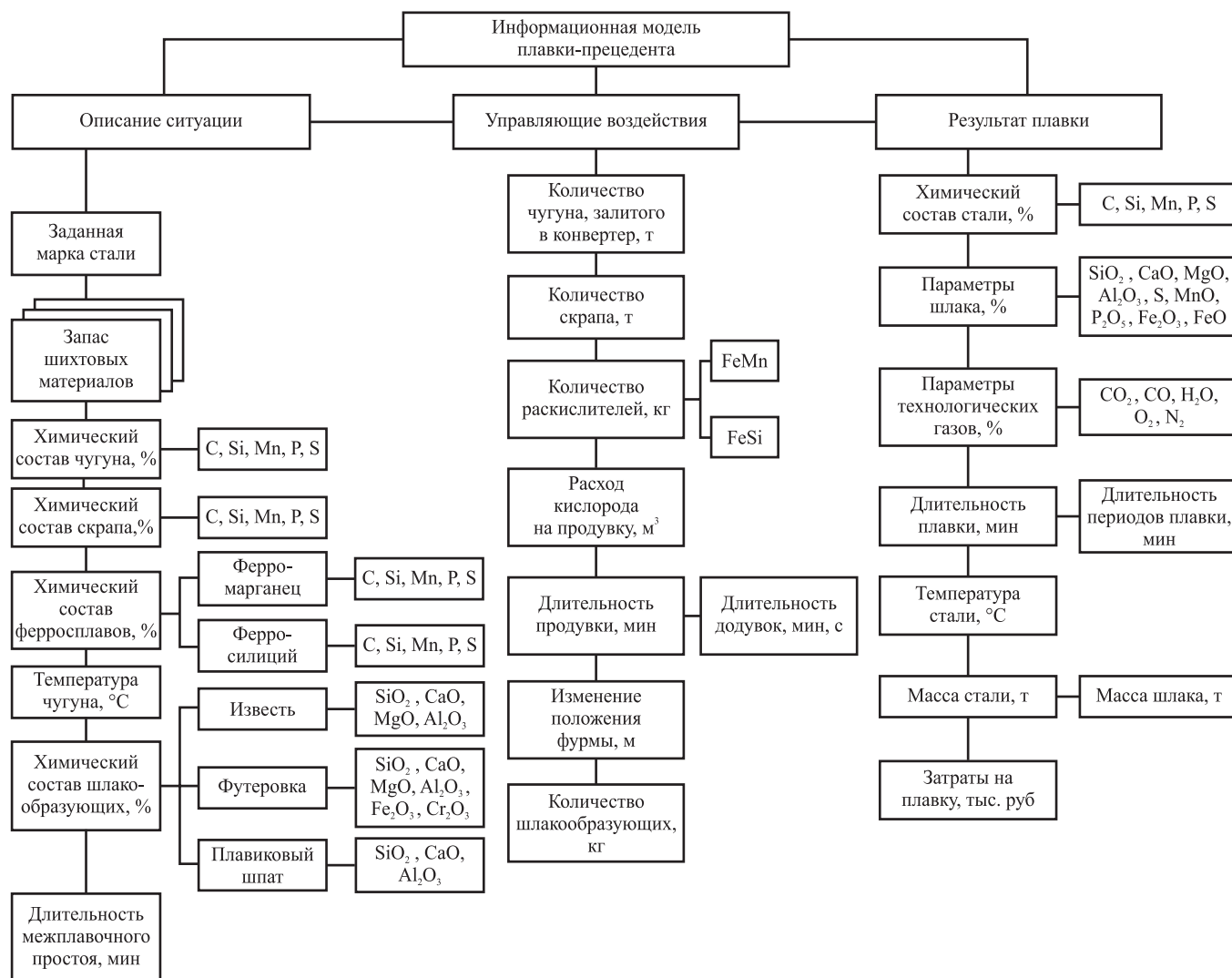


Рис. 4. Основные компоненты информационной модели прецедента (для выбора программы управления предстоящей плавкой стали в конвертере)

Fig. 4. The main components of CBR information model (for choosing a control program for upcoming steel melting in a converter)

**Пример определения параметров программы шихтовки и ведения плавки стали
в кислородном конвертере**

**Example of determining the parameters of charging program and conducting steel melting
in an oxygen converter**

Параметры плавки стали	Плавка-прецедент	Данные предстоящей плавки стали
Номер плавки	...568	...584
Дата плавки	15.09.18	16.09.18
Межплавочный простой [ч:мин:с]	0:09:59	0:26:56
Параметры жидкого чугуна		
Масса чугуна, т	255,1	<u>255,0</u> 256,4
Температура, °С	1338	1377
Si, %	0,28	0,45
Mn, %	0,38	0,41
S, %	0,055	0,02
P, %	0,07	0,069
Параметры лома		
Масса лома, т	93	<u>93,0</u> 94,8
Количество совков	2	<u>2</u> 2
Масса лома первого сорта, т	42,4	<u>42,4</u> 57,0
Масса лома второго сорта, т	50,6	<u>50,6</u> 37,0
Длительность нагрева [ч:мин:с]	00:06:51	<u>10:37*</u> 06:17
Расход кислорода на нагрев, м ³	2386	<u>3702*</u> 2200
Расход угля, т	3,08	<u>4,80*</u> 3,08
Длительность продувки [ч:мин:с]	00:20:15*	<u>20:15</u> 18:18
Длительность додувки [ч:мин:с]	00:00*	<u>00:00</u> 01:44
Расход на продувку, м ³	17265	<u>17 265</u> 17 443
Расход извести, т	11,52	<u>11,52</u> 14,11
Расход известняка, т	0,53	<u>0,53</u> 0
Расход флюса, т	4,07	<u>4,07</u> 4,11
Расход флюса ФМ, т	0,99	<u>0,99</u> 0,99
Данные на повалке		
Основность шлака	2,51	<u>2,51</u> 2,30
Расход кислорода на плавку, м ³	19651	<u>19 651</u> 19 643

Т а б л и ц а (продолжение)

Параметры плавки стали	Плавка-прецедент	Данные предстоящей плавки стали
Содержание Al_2O_3 , %	1,79	$\frac{1,79}{2,58}$
Содержание C, %	0,039	$\frac{0,039}{0,048}$
Содержание CaO, %	26,4	$\frac{26,4}{26,0}$
Содержание MgO, %	11,3	$\frac{11,3}{8,2}$
Содержание FeO, %	43,1	$\frac{43,1}{42,6}$
Содержание P, %	0,006	$\frac{0,006}{0,004}$
Содержание Mn, %	0,064	$\frac{0,064}{0,045}$
Содержание MnO, %	4,62	$\frac{4,62}{4,68}$
Содержание P_2O_5 , %	1,08	$\frac{1,08}{0,99}$
Содержание S, %	0,043	$\frac{0,043}{0,034}$
Содержание SiO_2 , %	10,5	$\frac{10,5}{11,3}$
Содержание TiO_2 , %	0,56	$\frac{0,56}{0,90}$
Содержание V_2O_5 , %	0,86	$\frac{0,86}{1,12}$
Температура, °C	1627	$\frac{1627}{1586}$
Длительность плавки, мин:с	46:38	$\frac{49:24^*}{46:38}$

П р и м е ч а н и е. Номер конвертера – 4; использовали сталь марки СтЗпс/з; код способа разливки стали – 0; в числителе третьего столбца указаны значения параметров, соответствующие программе ведения плавки, в знаменателе – фактические значения.

$$G_Y^* = \begin{cases} \left[G_Y \frac{\tau_{мп}^{пр}}{\tau_{мп}} \right], & \text{если } [\cdot] \leq G_Y^{\max}; \\ G_Y^{\max}, & \text{если } [\cdot] > G_Y^{\max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$V^*(O_2)_{пд} = V(O_2)_{пд} \frac{G_Y^*}{G_Y}; \quad (3)$$

$$T_{пг}^* = T_{пг} \frac{V^*(O_2)}{V(O_2)}, \quad (4)$$

где G_Y^* , $V(O_2)_{пд}$ и $T_{пг}^*$ – скорректированные расход угля, кислорода и длительность подогрева металлолома; $\tau_{мп}^{пр}$ и $\tau_{мп}$ – длительность межплавочного простоя для предстоящей и прецедентной плавки; G_Y и $G_Y^{\max} = 4,8$ т –

прецедентный и максимально допустимый расход угля на подогрев.

Длительность плавки в целом $T_{пл}$ скорректирована с учетом увеличения прецедентной длительности $T_{пг}$ подогрева металлолома:

$$T_{пл}^* = T_{пл} + (T_{пг}^* - T_{пг}). \quad (5)$$

Моделирование алгоритма выбора оптимального прецедента и его коррекция (при наличии дефектов) показала, что затраты времени на его реализацию (при взаимодействии с мастером и оператором дистрибутора) на современных компьютерах не превышают 2 – 3 мин. Первичные данные для решения задачи построения программы управления предстоящей плав-

кой стали формируются по ходу выполнения текущей плавки в режиме реального времени. В этот же период решаются задачи поиска лучших плавок-прецедентов и шихтовки предстоящей плавки. Полностью формирование новой программы управления заканчивается во время завершения (выпуска) текущей плавки и оценки состояния конвертера.

Эффективность вышеизложенного подхода к управлению процессом выплавки стали в кислородном конвертере обеспечивается реализацией идеи непрерывного улучшения управлений, когда новое управляющее решение формируется на основе ситуационно выбранного наилучшего из ранее реализованных аналогичных решений-прецедентов. При этом важное значение имеет подбор метрик качества прецедентов. В частности, весьма полезно при управлении процессом выплавки стали включать в информационную модель прецедента показатель: затраты на выполнение конкретной плавки.

Выводы

Выполнен анализ известных подходов и методов управления сложными металлургическими агрегатами. Изложена идея нового (по отношению к системам управления сложными агрегатами и комплексами) прецедентного метода online-накопления и использования опыта принятия управляющих решений в эргатических (человеко-машинных) системах управления. Разработан модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений и соответствующая ему функциональная схема системы управления агрегатами циклического действия. Применительно к управлению плавкой стали в конвертере представлены основные компоненты информационной модели прецедента и пример формирования программы управления предстоящей плавкой на основе данных прецедентной плавки. Отмечена более высокая эффективность управления предстоящей плавкой стали на основе прецедента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: МЭИ, 2008. 400 с.
2. Maiworm M., Bähge T., Findeisen R. Scenario-based model predictive control: Recursive feasibility and stability // IFAC – Papers Online. 2015. Vol. 48. No. 8. P. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.156>
3. Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. Nob Hill Publishings, LLC, 2009.
4. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC-усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 56–62.
5. Кулаков С.М., Бондарь Н.Ф., Зимин В.В. О структуризации пространства подходов к исследованию автоматизированных систем на разных стадиях их жизненного цикла. В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011. С. 26–34.
6. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. Кемерово, М.: изд. об-ние «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2008. 487 с.
7. Мышляев Л.П. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода. В 3-х томах. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения. Новосибирск: Наука, 2006. 483 с.
8. Богусhevskii V.S., Grabovskii G.G., Mikhailov V.M. и др. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки // Сталь. 2006. № 1. С. 18–21.
9. Богусhevskii V.S., Grabovskii G.G., Церковницкий Н.С., Ушаков В.А. Система управления конвертерной плавкой // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2007. № 4. С. 232–235.
10. Pan R., Yang Q., Pan S.J. Mining competent case bases for case-based reasoning // Artificial Intelligence. 2007. Vol. 171. No. 16-17. P. 1039–1068. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2007.04.018>
11. Варшавский П.Р., Алехин Р.В. Метод поиска решений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // International Journal "Information Models and Analyses". 2013. Vol. 2. No. 4. P. 385–392.
12. Avdeenko T.V., Makarova E.S. Integration of case-based and rule-based reasoning through fuzzy inference in decision support sys-
1. Rotach V.Ya. Theory of Automatic Control. Moscow: MEI, 2008, 400 p. (In Russ.).
2. Maiworm M., Bähge T., Findeisen R. Scenario-based model predictive control: Recursive feasibility and stability. IFAC – Papers Online. 2015, vol. 48, no. 8, pp. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.156>
3. Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. Nob Hill Publishings, LLC, 2009.
4. Dozortsev V.M., Kneller D.V. APC-advanced process control. *Datchiki i sistemy*. 2005, no. 10, pp. 56–62. (In Russ.).
5. Kulakov S.M., Bondar' N.F., Zimin V.V. On structuring the space of approaches to the study of automated systems at different stages of their life cycle. In: *Automation Systems in Education, Science and Production. Proceedings of the 8th All-Russ. Sci. and Pract. Conf.* Novokuznetsk: ITs SibSIU, 2011, pp. 26–34. (In Russ.).
6. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P., etc. *Theory and Practice of Forecasting in Control Systems*. Kemerovo; Moscow: Rossiiskie universitety; Kuzbassvuzizdat – ASTSh, 2008, 487 p. (In Russ.).
7. Myshlyayev L.P. *Automation Systems Based on a Full-Scale Model Approach. Vol. 2. Automation Systems for Industrial Purposes*. Novosibirsk: Nauka, 2006, 483 p. (In Russ.).
8. Bogushevskii V.S., Grabovskii G.G., Mikhailov V.M., etc. Computer model for calculating the charge and purge of converter melting. *Stal'*. 2006, no. 1, pp. 18–21. (In Russ.).
9. Bogushevskii V.S., Grabovskii G.G., Tserkovnitskii N.S., Ushakov V.A. Converter melting control system. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2007, no. 4, pp. 232–235. (In Russ.).
10. Pan R., Yang Q., Pan S.J. Mining competent case bases for case-based reasoning. *Artificial Intelligence*. 2007, vol. 171, no. 16-17, pp. 1039–1068. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2007.04.018>
11. Varshavskii P.R., Alekhin R.V. Method of finding solutions in intelligent decision support systems based on CBR. *International Journal "Information Models and Analyses"*. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 385–392. (In Russ.).
12. Avdeenko T.V., Makarova E.S. Integration of case-based and rule-based reasoning through fuzzy inference in decision support sys-

- tems // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 103. P. 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.016>
13. Wan S., Li D., Gao J., Li J. A knowledge based machine tool maintenance planning system using case-based reasoning techniques // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 58. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.01.012>
 14. Thihe P.H., Xu Z., Cheng Y., Jin Y., Shi P. Materials failure analysis utilizing rule-case based hybrid reasoning method // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 95. P. 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.033>
 15. Guo Y., Chen W., Zhu Y.-X., Guo Y.-Q. Research on the integrated system of case-based reasoning and Bayesian network // *ISA Transactions*. 2019. Vol. 90. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.12.049>
 16. Relicha M., Pawlewskib P. A case-based reasoning approach to cost estimation of new product development // *Neurocomputing*. 2018. Vol. 272. P. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.092>
 17. Xia J., Chen G., Tan P., Zhang C. An online case-based reasoning system for coal blends combustion optimization of thermal power plant // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. Vol. 62. P. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.036>
 18. Карпов Л.Е., Юдин В.Н. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов. В кн.: Труды Института системного программирования РАН. Т. 13. Ч. 2. М.: ИЦ ИСП, 2007. С. 37–58.
 19. Кулаков С.М., Трофимов В.Б., Добрынин А.С., Тараборина Е.Н. Прецедентный подход к формированию программ управления объектами циклического действия. В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2017. Труды XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 14–16 декабря 2017 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 11–19.
 20. Monfeta D., Corsib M., Choinièreb D., Arkhipovab E. Development of an energy prediction tool for commercial buildings using case-based reasoning // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 81. P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.017>
 - tems. *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 103, pp. 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.016>
 13. Wan S., Li D., Gao J., Li J. A knowledge based machine tool maintenance planning system using case-based reasoning techniques. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019, vol. 58, pp. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.01.012>
 14. Thihe P.H., Xu Z., Cheng Y., Jin Y., Shi P. Materials failure analysis utilizing rule-case based hybrid reasoning method. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 95, pp. 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.033>
 15. Guo Y., Chen W., Zhu Y.-X., Guo Y.-Q. Research on the integrated system of case-based reasoning and Bayesian network. *ISA Transactions*. 2019, vol. 90, pp. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.12.049>
 16. Relicha M., Pawlewskib P. A case-based reasoning approach to cost estimation of new product development. *Neurocomputing*. 2018, vol. 272, pp. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.092>
 17. Xia J., Chen G., Tan P., Zhang C. An online case-based reasoning system for coal blends combustion optimization of thermal power plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014, vol. 62, pp. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.036>
 18. Karpov L.E., Yudin V.N. Adaptive management based on classification of controlled objects states. In: *Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences*, vol. 13, part 2. Moscow: ITS ISP, 2007, pp. 37–58. (In Russ.).
 19. Kulakov S.M., Trofimov V.B., Dobrynin A.S., Taraborina E.N. CBR approach to the formation of control programs for objects of cyclic action. In: *Automation Systems in Education, Science and Production AS'2017. Proceedings of the 11th All-Russ. Sci. and Pract. Conf. (with int. participation), December 14–16, 2017*. Novokuznetsk: ITS SibSIU, 2017, pp. 11–19. (In Russ.).
 20. Monfeta D., Corsib M., Choinièreb D., Arkhipovab E. Development of an energy prediction tool for commercial buildings using case-based reasoning. *Energy and Buildings*. 2014, vol. 81, pp. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.017>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Станислав Матвеевич Кулаков, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-0928-1753
E-mail: kulakov-ais@mail.ru

Роман Сергеевич Койнов, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-5547-5511
E-mail: koynov_rs@mail.ru

Михаил Васильевич Ляховец, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mvlyakhovets@gmail.com

Елена Николаевна Тараборина, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-4835-396X
E-mail: taraborina@list.ru

Stanislav M. Kulakov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-0928-1753
E-mail: kulakov-ais@mail.ru

Roman S. Koinov, Senior Lecturer of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-5547-5511
E-mail: koynov_rs@mail.ru

Mikhail V. Lyakhovets, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University
E-mail: mvlyakhovets@gmail.com

Elena N. Taraborina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-4835-396X
E-mail: taraborina@list.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. М. Кулаков – анализ известных подходов к управлению сложными технологическими объектами, модификация CBR-цикла принятия решений, алгоритмизация процедуры коррекции прецедентов.

S. M. Kulakov – analysis of known approaches to managing complex technological objects, modification of the CBR decision-making cycle, algorithmization of the reasoning correction procedure.

Р. С. Койнов – обзор первоисточников, разработка функциональной структуры системы управления на основе метода прецедентов, разработка информационной модели прецедента применительно к управлению плавкой стали в кислородном конвертере.

М. В. Ляховец – разработка методики и формул коррекции параметров плавки-прецедента.

Е. Н. Тараборина – моделирование процесса принятия управляющих воздействий и формирование примера применения метода прецедентов.

R. S. Koinov – review of primary sources, development of the functional structure of the control system based on CBR method, development of the reasoning information model in relation to the control of steel melting in an oxygen converter.

M. V. Lyakhovets – development of the method and formulas for correction of melting parameters-reasoning.

E. N. Taraborina – modeling of taking control actions and forming an example of the use of CBR method.

Поступила в редакцию 25.09.2021

После доработки 09.11.2021

Принята к публикации 16.11.2021

Received 25.09.2021

Revised 09.11.2021

Accepted 16.11.2021