

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.184:681.5.01

## СОВМЕСТНЫЙ СИНТЕЗ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОДСИСТЕМЫ

*Ляховец М.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент (lyakhovets\_mv@siu.sibsiu.ru)*

*Ивушкин К.А.<sup>2</sup>, к.э.н., первый заместитель генерального директора*

*Мышляев Л.П.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор*

*Чернявский С.В.<sup>3</sup>, старший научный сотрудник*

*Львова Е.И.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская область, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой»

(654034, Россия, Кемеровская область, г. Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

<sup>3</sup> НИИ Кемеровский государственный университет

(654041, Россия, Кемеровская область, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

**Аннотация.** Предложен новый подход к построению систем управления, заключающийся в совместном синтезе объекта управления и управляющей подсистемы. Сделана постановка задачи такого синтеза на основе набора моделей объектов и алгоритмов управления с формированием допустимых комбинаций «модель объекта – алгоритм управления». Предложено эффективное решение поставленной задачи путем имитационного натурно-математического моделирования. Представлены примеры синтеза системы управления кислородно-конвертерной плавки стали. Выявлена необходимость расширения моделей плавки стали путем включения факторов, влияющих на параметры конвертера в процессе продувки кислородом. Получены технико-экономические показатели различных вариантов систем управления. Показано, что система «комбинированная модель объекта с оперативным изменением параметров конвертера – комбинированный алгоритм управления» имеет лучшие технико-экономические показатели.

**Ключевые слова:** система управления, моделирование, натурно-математическое имитационное моделирование, модель объекта, управляющая подсистема, алгоритм управления, кислородно-конвертерный процесс.

Возможности выполнения требований к динамическим свойствам систем управления должны закладываться на стадии их проектирования. Традиционная же последовательность проектирования промышленных комплексов заключается в проектировании сначала технологических схем (объектов), а затем управляющей подсистемы. Из этого следует, что на управляющую подсистему возлагается достижение требуемых свойств всей системы управления. Это может привести либо к значительному усложнению управляющей подсистемы, либо даже к невозможности получения требуемого свойства всей системы. Более эффективен совместный синтез и объекта, и управляющей подсистемы.

Вариант постановки задачи такого рода синтеза можно представить в следующем виде.

### Постановка задачи совместного синтеза объекта управления и управляющей системы

**Дано:** 1. Конечное множество структур моделей  $\Phi_j$  объекта

$$Y_j(t) = \Phi_j(t) \left[ U(t - \theta_U), Y(t - \theta_Y), W(t - \theta_W), \xi(t - \theta_\xi) \right], \quad (1)$$

где  $Y(t)$ ,  $U(t)$ ,  $W(t)$ ,  $\xi(t)$  – соответственно векторы выходных, управляющих, внешних и неконтролируемых воздействий в  $t$ -ый момент времени;  $t$  – непрерывное или дискретное время;  $\theta_U, \theta_Y, \theta_W, \theta_\xi \geq 0$  – время динамической памяти;  $j = 1, J, J$  – количество структур моделей объекта;  $\Phi_j$  – оператор преобразования модели  $j$ -ой структуры;

2. Конечное множество алгоритмов управления

$$U_l(t) = F_l(t) \left[ U(t - \theta_{U_l}), Y(t - \theta_{Y_l}), W(t - \theta_{W_l}), Y^*(t) + \theta_{Y_l}^* \right], \quad (2)$$

где  $F_l$  – оператор  $l$ -го алгоритма управления,  $l = \overline{1, L}$ ;  $L$  – количество алгоритмов управления объектом;  $Y^*$  – вектор задающих воздействий;  $\theta_{Y_l}^*$  – длительность интервала времени известных предстоящих траекторий  $Y^*$ ;  $\theta_{U_l}, \theta_{Y_l}, \theta_{W_l} \geq 0$  – заданные длительности интервалов времени;

3. Критерий эффективности вариантов систем управления

$$Q_m = q_m \left[ U_l, Y_j, Y^*, t \right], \quad (3)$$

где  $q_m$  – оператор  $m$ -го критерия эффективности вариантов системы управления,  $m \in \{j, l\}$ ;

4. Ограничения

$$U \in U^*, Y \in Y^*, \quad (4)$$

где  $U^*$  и  $Y^*$  – векторы заданных ограничений на управляющие и выходные воздействия.

**Требуется:** синтезировать систему управления, оптимизирующую показатель (3) при выполнении ограничений (4).

Эффективное решение поставленной задачи можно осуществить на основе натурно-математического имитационного моделирования [1, 2] вариантов систем управления, сформированных из различных сочетаний моделей объектов и управляющих алгоритмов.

**Пример совместного синтеза для условий кислородно-конвертерного производства стали**

Совместный синтез объектов управления и управляющих подсистем заключается в выполнении следующих операций:

1. Формирование множества моделей кислородно-конвертерного процесса производства стали (объекта управления):

- балансово-термодинамическая модель, построенная на основе фундаментальных физико-химических закономерностей [3 – 6];

- функциональная модель, построенная, преимущественно, статистическими методами и отражающая вход-выходные зависимости [7 – 12];

- комбинированная модель, объединяющая базовую составляющую движения и компоненту в приращениях к опорному движению [13].

2. Формирование набора алгоритмов управления кислородно-конвертерным процессом:

- балансовый алгоритм управления, основу которого составляет балансовая модель [14 – 16];

- алгоритм восстановительно-прогнозирующего управления [17, 18];

- комбинированный алгоритм, объединяющий балансовый и восстановительно-прогнозирующий алгоритмы [13, 19].

3. Формирование набора моделей систем управления из сочетаний объекта «модель объекта – алгоритм управления».

Решение данной задачи привело к необходимости введения в структуру модели новых факторов (соотношения глубины жидкой ванны расплава к ее диаметру, угла раскрытия сопел продувочной фурмы, топографии износа футеровки конвертера по ходу кампании), позволяющих учитывать влияние изменения объекта управления по ходу его эксплуатации на его выходные показатели.

Для получения комплексной оценки эффективности сочетаний «модель объекта – алгоритм управления» было проведено натурно-математическое имитационное моделирование на основе технологических данных кислородно-конвертерного цеха ОАО «Северсталь». В табл. 1 представлены результаты имитационного мо-

Т а б л и ц а 1

**Результаты имитационного моделирования**

Вариант «модель объекта – алгоритм управления»	Показатели плавки					
	Доля попадания в заданные пределы, %			Расход извести, кг/т	Выход жидкой стали, %	Изменение цикла плавки, мин
	по $T$	по $\{C, T\}$	по $\{C, T, P\}$			
Балансовая модель – балансовый алгоритм	50	42	39	45,3	83,1	2,3
Балансовая модель – восстановительно-прогнозирующий алгоритм	53	47	43	45,4	83,4	1,7
Балансовая модель – комбинированный алгоритм	56	52	47	42,3	84,3	1,3
Функциональная модель – балансовый алгоритм	52	43	40	42,9	84,6	2,0
Функциональная модель – восстановительно-прогнозирующий алгоритм	53	50	48	41,7	85,5	0,6
Функциональная модель – комбинированный алгоритм	57	53	51	39,3	86,2	0,5
Комбинированная модель – балансовый алгоритм	55	49	46	41,8	86,2	0,5
Комбинированная модель – восстановительно-прогнозирующий алгоритм	59	54	49	40,3	86,9	0,6
Комбинированная модель – комбинированный алгоритм	69	62	55	38,4	87,6	0,6

П р и м е ч а н и е. С и Р – содержание углерода и фосфора в металле;  $T$  – температура металла на первой повалке.

Результаты имитационного моделирования по комбинированной модели

Тип системы управления	Показатели плавки						Технико-экономические показатели		
	Доля попадания в заданные пределы, %			Расход извести, кг/т	Выход жидкой стали, %	Изменение цикла плавки, мин	Изменение затрат на технологические нововведения, млн. руб	Затраты на реализацию алгоритмов, млн. руб	Суммарный экономический эффект, млн. руб в год
	по $T$	по $\{C, T\}$	по $\{C, T, P\}$						
Комбинированная модель – балансовый алгоритм	$\frac{55}{64}$	$\frac{49}{61}$	$\frac{46}{57}$	$\frac{41,8}{39,1}$	$\frac{86,2}{87,1}$	$\frac{0,5}{0}$	0,2	6,91	$\frac{-15,2}{-12,2}$
Комбинированная модель – восстановительно-прогнозирующий алгоритм	$\frac{59}{71}$	$\frac{54}{59}$	$\frac{49}{53}$	$\frac{40,3}{38,8}$	$\frac{86,9}{87,9}$	$\frac{0,6}{-0,3}$	-1,3	6,93	$\frac{+52,2}{+55,2}$
Комбинированная модель – комбинированный алгоритм	$\frac{69}{81}$	$\frac{62}{73}$	$\frac{55}{71}$	$\frac{38,4}{34,1}$	$\frac{87,6}{88,9}$	$\frac{0,6}{-0,6}$	-2,1	7,02	$\frac{+90,2}{+112,2}$

П р и м е ч а н и е. В числителе – значения показателей без изменения объекта управления, в знаменателе – с дополнительными изменениями.

делирования сформированных систем управления без учета изменений свойств объекта в процессе эксплуатации. Из всех возможных комбинаций «модель объекта – алгоритм управления» лучшей оказалась комбинированная модель в сочетании с комбинированным алгоритмом управления.

Поскольку наиболее эффективными системами управления оказались системы с комбинированной моделью объекта, то для них проведены дополнительные исследования с учетом влияния изменений свойств объекта управления по ходу его эксплуатации на выходные показатели кислородно-конвертерного процесса. В табл. 2 представлены результаты пересчетного имитационного моделирования.

**Выводы.** Совместный синтез объекта управления и управляющей подсистемы позволяет эффективнее достигать требуемых свойств системы управления в целом. Использование такого подхода позволило уже на первых стадиях решения конкретных производственных задач сформировать проектные предложения, повышающие технико-экономические показатели функционирования конвертерного цеха.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Мышляев Л.П., Щелоков А.Е., Евтушенко В.Ф. Библиотека сборника «Математические и экономические модели в оперативном управлении производством». Вып. 4. – М.: Электрика, 2000. – 49 с.
2. Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Грачев В.В., Шипунов М.В. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2012. № 2. С. 35 – 40.
3. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
4. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии: учебник для вузов. – Кемерово: Кузбассвузиздат-АСТИ; М.: Российские университеты, 2006. – 431 с.
5. Jalkanen H. Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF) // Sohn International Symposium; Advanced Processing of Metals and Materials. Vol. 2: Thermo and Physicochemical Principles: Iron and Steel Making. 2006. Vol.2. P. 541 – 554.
6. Lytvynuk Y., Schenk J., Hiebler M., Sormann A. Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model // Steel research international. 2014. Vol. 85(4). P. 537 – 543.
7. Колпаков С.В., Тедер Л.И., Дубровский С.А. Управление конвертерной плавкой. – М.: Металлургия, 1981. – 144 с.
8. Соколов Б.М., Шепелявый А.И., Медведев А.В. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1: Математика. Механика. Астрономия. 2003. № 2. С. 58 – 65.
9. Богушевский В.С., Сухенко В.Ю., Сергеева Е.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 24 – 27.
10. Hideaki S., Ryo I. Thermodynamic Assessment of Hot Metal and Steel Dephosphorization with MnO-containing BOF Slags // ISIJ International. 1995. Vol. 35(3). P. 258 – 265.
11. Brooks G.A., Dogan N., Alam M., Naser J., Rhamdhani M.A. Developments in the modelling of oxygen steelmaking. Guthrie Symposium Montreal: McGill University. 2011.
12. Dogan N., Brooks G.A., Rhamdhani M.A. Comprehensive model of oxygen steelmaking part 1: model development and validation // ISIJ international. 2011. Vol. 51(7). P. 1086 – 1092.
13. Способы расчета масс материалов конвертерного производства / В.П. Авдеев, Р.С. Айзатулов, Л.П. Мышляев и др. – М.: Металлургия, 1994. – 192 с.
14. Туркенич Д.И. Управление плавкой стали в конверторе. – М.: Металлургия, 1976. – 292 с.
15. Глинков Г.М., Маковский В.А. АСУТП в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1999. – 310 с.

16. Han M., Zhao Y. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine // *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38(12). P. 14786 – 14798.
17. Кошелев А.Е., Соловьев В.И., Айзатулов Р.С. и др. // *Приборы и системы управления*. 1977. № 1. С. 9 – 11.
18. Jun T., Xin W., Tianyou C., Shuming X. Intelligent control method and application for BOF steelmaking process // *World Congress*. 2002. Vol. 15(1). P. 724 – 726.
19. Комбинированное управление конвертерной плавкой / М.И. Волочич, В.П. Авдеев, И.П. Герасименко, Е.В. Протопопов. – Кемерово: Кн. изд-во, 1990. – 142 с.

© 2014 г. Ляховец В.М., Ивушкин К.А.,  
Мышляев Л.П., Чернявский С.В.,  
Львова Е.И.  
Поступила 27 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 12, pp. 33–36.

## THE JOINT SYNTHESIS OF THE CONTROLLED OBJECT AND CONTROL SUBSYSTEM

**Lyakhovets M.V.<sup>1</sup>**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor*  
(lyakhovets\_mv@siu.sibsiu.ru)

**Ivushkin K.A.<sup>2</sup>**, *Cand. Sci. (Economics), First Deputy Director*

**Myshlyaev L.P.<sup>1</sup>**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

**Chernyavskii S.V.<sup>3</sup>**, *Senior Researcher*

**L'vova E.I.<sup>1</sup>**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

<sup>1</sup> **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

<sup>2</sup> **LLC “United Company “Sibshakhtostroi”** (9, Kuznetskoe road, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654034, Russia)

<sup>3</sup> **Novokuznetsk Institute (branch) of Kemerovo state University** (23, Tsiolkovskogo str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654041, Russia)

**Abstract.** This article proposes a new approach to building control systems, consisting in the joint synthesis of the controlled object and the control subsystem. The authors made the formulation of such a synthesis based on a set of object models and control algorithms with the formation of allowable combinations “model of object – control algorithm”. The effective solving of the problem by simulation of natural and mathematical modeling was proposed. The article shows the examples of synthesis of control systems of steel melting in basic oxygen furnace (steel melting control system in basic oxygen converter). The authors identified the need to expand models for steel melting by including factors affecting the parameters of the converter during oxygen blowing. The technical and economic performances of various control systems were received. It is shown that the system “The combined model of the object with the operational settings of the converter characteristics – the combined control algorithm” has the best technical and economic indicators.

**Keywords:** synthesis of control systems, modeling, natural-mathematical modeling, object model, control subsystem, control algorithm, the oxygen-converter process.

### REFERENCES

1. Myshlyaev L.P., Shchelokov A.E., Evtushenko V.F. *Biblioteka sbornika “Matematicheskie i ekonomicheskie modeli v operativnom upravlenii proizvodstvom”* [Library collection “Mathematical and economic models in the operational management of production”]. Issue 4. Moscow: ElektriKa. 2000. 49 p. (In Russ.).
2. Myshlyaev L.P., Ivushkin K.A., Grachev V.V., Shipunov M.V. The combined simulation modeling – the basis of the problem decision of automated system development. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2012, no. 2, pp. 35–40. (In Russ.).
3. Bigeev A.M. *Matematicheskoe opisaniye i raschety staleplavil'nykh protsessov* [Mathematical description and calculations of steelmaking processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 160 p. (In Russ.).
4. Tsymbal V.P. *Matematicheskoe modelirovaniye slozhnykh sistem v metallurgii* [Mathematical modeling of complex systems in metallurgy]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat-ASTSh; Moscow: Rossiiskie universitety, 2006. 431 p. (In Russ.).
5. Jyalkanen H. Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF). *Sohn International Symposium; Advanced Processing of Metals and Materials*. Vol. 2: Thermo and Physicochemical Principles: Iron and Steel Making. 2006. Vol. 2, pp. 541–554.
6. Litvinyuk Y., Schenk J., Hiebler M., Sormann A. Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model. *Steel research international*. 2014. Vol. 85(4), pp. 537–543.
7. Kolpakov S.V., Teder L.I., Dubrovskii S.A. *Upravlenie konverternoi plavkoi* [Control of the converter process]. Moscow: Metallurgiya, 1981. 144 p. (In Russ.).
8. Sokolov B.M., Shepelyavii A.I., Medvedev A.V. Adaptive control of the converter melting of steel. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1: Matematika. Mekhanika. Astronomiya*. 2003, no. 2. pp. 58–65. (In Russ.).
9. Bogushevskii V.S., Sukhenko V.Yu., Sergeeva E.A. A mathematical model of the control of the blowing mode of converter smelting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 8, pp. 24–27. (In Russ.).
10. Hideaki S., Ryo I. Thermodynamic Assessment of Hot Metal and Steel Dephosphorization with MnO-containing BOF Slags. *ISIJ International*. 1995. Vol. 35(3), pp. 258–265.
11. Brooks G.A., Dogan N., Alam M., Naser J., Rhamdhani M.A. Developments in the modelling of oxygen steelmaking. *Guthrie Symposium Montreal*. McGill University. 2011.
12. Dogan N., Brooks G.A., Rhamdhani M.A. Comprehensive model of oxygen steelmaking. Part 1: model development and validation. *ISIJ international*. 2011. Vol. 51(7), pp. 1086–1092.
13. Avdeev V.P., Aizatulov R.S., Myshlyaev L.P., Petrunin M.V., Sarapulov Yu.A. *Sposoby rascheta mass materialov konverternogo proizvodstva* [Methods of material mass calculating of converter production]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 192 p. (In Russ.).
14. Turkenich D.I. *Upravlenie plavkoi stali v konvertore* [Control of steel melting in the converter]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 292 p. (In Russ.).
15. Glinkov G.M., Makovskii V.A. *ASUTP v chernoii metallurgii* [APCS in ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1999. 310 p. (In Russ.).
16. Han M., Zhao Y. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38(12), pp. 14786–14798.
17. Koshelev A.E., Solov'ev V.I., Aizatulov R.S., Petrunin M.V., Avdeev V.P. Experience of adapting control systems of technological processes. *Pribory i sistemy upravleniya*. 1977, no. 1, pp. 9–11. (In Russ.).
18. Jun T., Xin W., Tianyou C., Shuming X. Intelligent control method and application for BOF steelmaking process. *World Congress*. 2002. Vol. 15(1), pp. 724–724.
19. Volovich M.I., Avdeev V.P., Gerasimenko I.P., Protopopov E.V. *Kombinirovannoe upravlenie konverternoi plavkoi* [Combined control of the converter smelting]. Kemerovo: Kn. Izd-vo, 1990. 142 p. (In Russ.).

Received October 27, 2014