ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Том 59. № 2. С. 138 – 141.
© 2016. *Мышляев Л.П., Агеев Д.А., Чернявский С.В.*

УДК 669.046:658.52.011.56

УПРАВЛЕНИЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫМ ПЕРИОДОМ ПРОДУВКИ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ СТАЛИ С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ МОДЕЛИ*

Мышляев Л.П.[1], *д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем*
Агеев Д.А.[2], *к.т.н., инженер лаборатории «Системы исследований технических объектов»* (Now_dm@mail.ru)
Чернявский С.В.[2], *инженер лаборатории «Системы исследований технических объектов»*

[1] **Сибирский государственный индустриальный университет**
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
[2] **Кемеровский государственный университет, Новокузнецкий институт (филиал) (НФИ КемГУ)**
(654000, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

Аннотация. Предложен алгоритм дуального управления с одновременной идентификацией модели изменение интенсивности расхода кислорода на продувку – изменение содержания CO в отходящих газах конвертерной плавки стали и корректировкой расхода кислорода в заключительный период плавки. Такое объединение достигнуто за счет нанесения управляющего воздействия ступенчатого типа в заданный момент времени и фиксации его на интервале времени переходного процесса от этого воздействия, регистрации на интервале времени переходного процесса данных об управляющем и выходном воздействиях, расчета по этим данным коэффициентов модели и величины управляющего воздействия с использованием полученных оценок коэффициентов, реализация управляющих воздействий на следующем интервале управления. Представлены результаты оценки эффективности предложенного алгоритма управления: показатель «гладкости» временного ряда содержания углерода в металле в особой точке и процент попадания содержания углерода в стали в заданный интервал на повалке конвертера.

Ключевые слова: алгоритм идентификации, алгоритм дуального управления, замкнутая динамическая система, математическое моделирование, управляющее воздействие, параметры модели, «особая» точка, кислородно-конвертерный процесс, информативные данные.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-138-141

Развитые в работах [1, 2] методы оперативной идентификации позволили эффективно объединить процедуры построения моделей объектов управления с одновременной выработкой управляющих воздействий, т. е. осуществить идею дуального управления [3].

Это положение конкретизировано на примере коррекции величины расхода кислорода в заключительный период кислородной продувки с совместным уточнением параметров модели изменение интенсивности расхода кислорода на продувку – изменение содержания CO в отходящих газах конвертерной плавки стали.

В теории и практике кислородно-конвертерной плавки стали разработаны и функционируют алгоритмы расчета количества кислорода на продувку с корректировкой этого расхода в зависимости от так называемой «особой» точки [4]. Эта точка характеризуется резким уменьшением содержания CO в отходящих газах в заключительный период продувки [5, 6]. Моменту появления особой точки соответствует определенное содержание углерода в металле [7]. Зная содержание углерода в металле практически перед самым концом продувки, можно достаточно точно рассчитать количество необходимого для продувки кислорода [8, 9], чтобы получить требуемое (заданное) содержание углерода в стали. На этих представлениях и построены алгоритмы корректировки расхода кислорода.

Положение осложняется тем, что содержание углерода в металле в особой точке ($C_{от}$) не является постоянной величиной и зависит от многих факторов [10, 11], поэтому этот параметр на текущей *i*-й плавке приходится рассчитывать или экстраполировать по оценкам $C_{от}$ на предшествующих плавках. Вместе с тем, экстраполяция точек такого временного ряда даже на один такт не дает большого эффекта.

Содержание углерода в металле зависит от интенсивности расхода кислорода [12] на продувку и тесно связано с содержанием CO в отходящем газе. Стабилизация содержания газа $CO_{от}$ дает основание утверждать о стабилизации содержания углерода в металле в особой точке.

Зависимость $CO_{от}$ от интенсивности продувки нестационарная, что обусловлено изменением по ходу кампании характеристик газоотводящего тракта и газоанализирующей аппаратуры.

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту № 15-07-01972.

Зависимость изменение интенсивности продувки (I_{O_2}) – изменение содержания $CO_{от}$ в отходящих газах можно аппроксимировать моделью

$$T(t)\frac{d\delta CO_{от}(t)}{dt}+\delta CO_{от}(t)=k(t)\delta I_{O_2}(t-\tau(t)), \qquad (1)$$

где $T(t)$, $k(t)$ и $\tau(t)$ – постоянная времени, коэффициент передачи и время чистого запаздывания; t – непрерывное время.

Время чистого запаздывания увеличивается по ходу кампании, что объясняется снижением пропускной способности газоотводящего тракта, и практически линейно зависит от номера плавки кампании.

Оперативная идентификация коэффициентов T и k модели (1) предполагает выполнение следующих операций.

1. Переход от модели (1) к разностной форме

$$y(j)=b_1(j)y(j-1)+b_2(j)u(j-l),^{*} \qquad (2)$$

где b_1 и b_2 – коэффициенты; j – дискретное время; l – время дискретного запаздывания, и приведение к линейно-параметрическому виду

$$\delta CO_{от}(j)=b_1(j)\delta CO_{от}(j-1)+b_2(j)\delta I_{O_2}(j); \qquad (3)$$

$$u_1(j-l_1)=y(j-1)=\delta CO_{от}(j-1); \qquad (4)$$

$$u_2(j-l_2)=u(j-l_2)=\delta I_{O_2}(j-l_2), \qquad (5)$$

где $l_2=\mathrm{int}\left\{\frac{\tau}{\Delta}\right\}$, Δ – шаг дискретизации.

2. Оценивание коэффициентов b_1 и b_2 [1]

$$u_p(i)=u_{p,p}(i)+u_{p,u}(i); \qquad (6)$$

$$u_{p,p}(i)=a_p\varepsilon(i); \qquad (7)$$

$$u_{p,u}(i)=u_{p,u}(i-1)+a_u\varepsilon(i); \qquad (8)$$

$$\varepsilon(i)=y(i)-y^m(i); \qquad (9)$$

$$y^m(i)=b_1(i)y^m(i-1)+b_2(i)u(i); \qquad (10)$$

$$u_{p,j}(i)\overset{\Delta}{=}b_j(i). \qquad (11)$$

3. Переход от «промежуточных» коэффициентов b_1 и b_2 к исходным коэффициентам T и k

$$\hat{T}(j)=-\frac{\Delta}{\ln b_1(j)}; \qquad (12)$$

$$\hat{k}(j)=-\frac{b_2(j)}{1-b_1(j)}. \qquad (13)$$

Поскольку оперативная идентификация коэффициентов T и k модели (1) осуществляется по данным, полученным в ходе промышленной эксплуатации объекта, т.е. когда объект охвачен управляющими связями, необходимо специальное формирование исходных данных. Процедура формирования таких данных совмещена с процедурой выработки и реализации управляющих воздействий [3].

Суть такой процедуры заключается в выполнении операций:

- нанесения в заданный момент времени управляющего воздействия ступенчатого типа и фиксации его на интервале времени переходного процесса от этого воздействия;
- регистрации на интервале времени переходного процесса данных об управляющем δI_{O_2} и выходном $\delta CO_{от}$ воздействии и расчета по этим данным коэффициентов T и k;
- расчета величины управляющего воздействия $\delta I_{O_2}(i^*)$ с использованием полученных оценок T и k и реализации на следующем интервале переходного процесса, величина которого определяется также с использованием новых оценок T и k.

Алгоритм оперативной идентификации коэффициентов модели и выработки управляющих воздействий содержит основные блоки

$$I_{O_2}(i^*)=I_{O_2}(i^*-1)+\delta I_{O_2}(i^*); \qquad (14)$$

$$\delta I_{O_2}(i^*)=\frac{CO_{от}(i^*)-CO^*_{от}(i^*)}{\hat{k}(i^*)}; \qquad (15)$$

$$i^*=(i^*-1)+T_{п.п}(i-1); \qquad (16)$$

$$T_{п.п}(i-1)=3\hat{T}(i-1)+\hat{\tau}(i-1), \qquad (17)$$

где i^* – момент времени окончания переходного процесса (индекс «п.п») от ступенчатого изменения $\delta I_{O_2}(i^*-1)$ на предыдущем (i^*-1) такте управления.

В результате оперативно уточняются коэффициенты модели объекта, функционирующего в контуре управления, и одновременно вырабатываются управляющие воздействия с использованием уточненных коэффициентов модели.

Оценка эффективности алгоритма идентификации коэффициентов T, k, τ проводилась путем имитационного пересчетного моделирования [13 – 15].

На рис. 1 дана гистограмма распределения ошибок регулирования содержания CO в отходящих газах, полученных на 1150 плавках.

Из полученных данных следует, что при оперативном уточнении коэффициентов T и k модели (1) процент попадания ошибок регулирования содержания CO в диапазон ± 2 % на 35 % выше, чем без уточнения коэффициентов.

* Дискретное время обозначено как j внутри интервала переходного процесса для того, чтобы не совмещать с номером плавки i.

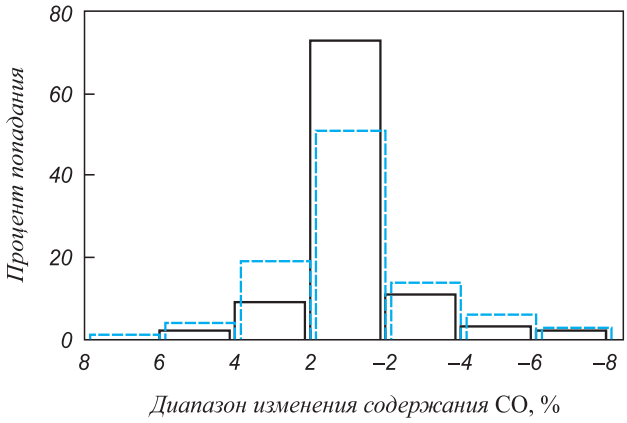

Рис. 1. Гистограмма распределения ошибок регулирования содержания CO в отходящих газах:
—— – с уточнением коэффициентов по предложенному алгоритму;
- - - – без уточнения коэффициентов

Fig. 1. Distribution chart of errors of carbon dioxide content control in exit gases:
—— – with the coefficient refinement by the offered algorithm;
- - - – without the coefficient refinement

Стабилизация содержания CO в отходящих газах привела к меньшей изменчивости содержания углерода в металле в особой точке. На рис. 2 показан пример динамики содержания углерода в особой точке в период со стабилизацией и без стабилизации содержания CO в отходящих газах. Даже визуально видно улучшение «гладкостных» свойств временного ряда, что повысило точность его экстраполяции.

Окончательная оценка эффективности оперативной идентификации коэффициентов сделана по ошибкам содержания углерода в готовой стали.

На рис. 3 приведены соответствующие гистограммы, из которых видно, что попадание на первой повалке конвертера в заданный интервал по содержанию углерода в стали увеличилось на 25 % и соответственно уменьшилось на 14 % количество корректирующих операций по углероду.

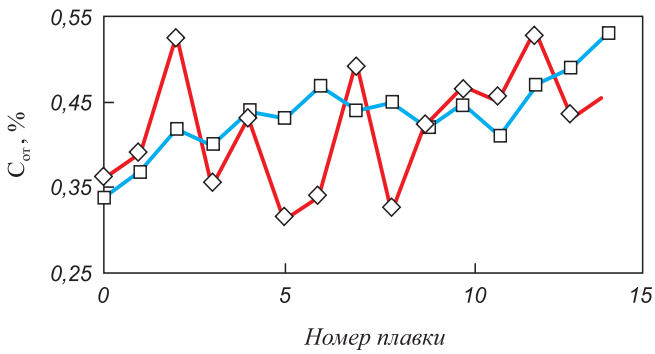

Рис. 2. Динамика содержания углерода в особой точке:
◇ – без стабилизации содержания CO; □ – со стабилизацией

Fig. 2. Dynamics of carbon content in the critical point:
◇ – without the carbon dioxide content stabilization; □ – with the stabilization

Выводы. Нестационарность кислородно-конвертерного процесса выплавки стали значительно усложняет управление им и вызывает необходимость оперативной «поднастройки» параметров моделей при выработке управляющих воздействий. Эффективным методом получения информативных данных для идентификации коэффициентов модели изменение интенсивности продувки – изменение содержания CO в отходящих газах конвертерной плавки служит объединение операции выработки управляющих воздействий и идентификации модели. Применение предложенного алгоритма идентификации динамических объектов с объединением метода формирования информативных данных позволило увеличить на 25 % число плавок с получением заданного содержания углерода в стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мышляев Л.П., Агеев Д.А. Синтез идентификаторов в виде замкнутых динамических систем // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 60 – 62.
2. Численные исследования идентификаторов на базе замкнутых динамических систем / Л.П. Мышляев, Д.А. Агеев, К.Г. Венгер и др. // Вестник КемГУ. 2011. № 4. С. 259 – 263.
3. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: Металлургия, 1971. – 744 с.
4. Способы расчета масс материалов конвертерного процесса / В.П. Авдеев, Р.С. Айзатулов, Л.П. Мышляев и др. – М.: Металлургия, 1994. – 192 с.
5. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. – М.: Металлургия, 1967. – 792 с.
6. Филиппов С.И. Теория критических концентраций. – В кн.: Физико-химические основы процессов производства стали. – М.: Наука, 1979. С. 79 – 87.
7. Iida Yoshiharu, Emoto Kanji, Ogawa Masakatsu, Masuda Yasuo, Onishi Massayuki, Yamada Hirosuke. Fully Automatic Blowing Technique for Steelmaking Furnace. Kawasaki Steel Giho, 1983, 15, no 2, p. 126 – 131.
8. Ойкс Г.Н., Иоффе Х.М. Производство стали (расчеты). – М.: Металлургия, 1975. – 480 с.

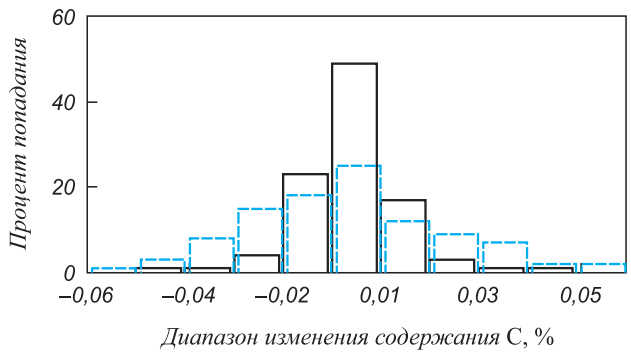

Рис. 3. Гистограмма распределения отклонений содержания углерода в стали на повалке конвертера от заданного значения:
—— – с уточнением коэффициентов по предложенному алгоритму;
- - - – без уточнения коэффициентов

Fig. 3. Distribution chart of errors of carbon dioxide content in steel on turn-down of converter from the given point:
—— – with the coefficient refinement by the given algorithm;
- - - – with the coefficient refinement

9. Кочо В.С., Богушевский В.С., Сорокин Н.А. и др. Математическое описание и алгоритм управления конверторной плавкой // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 5. С. 41 – 44.
10. Zaplowicz W., Stachowicz M. // Zesz. Nauk. PSw. Clek. 1981. № 8. p. 53 – 68.
11. Varkey G. Process automation in steel melting shop-from static modelling to expert systems // Electron.-Inf. and Plann. 1989. 17, № 1, p.19 – 26.
12. Туркенич Д.И. Управление плавкой стали в конвертере. – М.: Металлургия, 1971. – 360 с.
13. Натурно-математическое моделирование в системах управления: Учеб. пособие. / В.П. Авдеев, С.Р. Зельцер, В.Я. Карташов, С.Ф. Киселев. – Кемерово: изд. КемГУ, 1987. – 85 с.
14. Авдеев В.П. К основам натурно-математического моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 6. С. 131 – 135.
15. Волович М.И., Авдеев В.П., Парпаров Я.Г. Контроль и оценивание конвертерной плавки по косвенным параметрам. – Кемеровское кн. изд-во, 1989. – 124 с.

Поступила 26 октября 2015 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2016. Vol. 59. No. 2, pp. 138–141.

CONTROL OF THE FINAL BLOWING PERIOD OF OXYGEN-CONVERTER STEEL MELTING WITH MODEL IDENTIFICATION

***L.P. Myshlyaev*[1], *D.A. Ageev*[2], *S.V. Chernyavskii*[2]**

[1] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia
[2] Novokuznetsk Branch of the Kemerovo State University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The authors have offered the algorithm of dual-mode control with the simultaneous identification of the change model of oxygen expense intensity for blowing – carbon dioxide content change in exit gases of steel converter melting and the correction of oxygen expense during the final period of melting. Such a unification was reached at the expense of control action of a step type in the given point of time and its fixation on the time interval of a transient process from this action, registration of the data of control and output actions at the time interval of a transient process, calculation by these data of model coefficient and the size of control action with the use of the received coefficient assessment, realization of control actions on the next control interval. The article also presents the results of efficiency assessment of the proposed control algorithm: the indicator of "smoothness" of the time series of carbon control in metal in the critical point and the percentage of hits of carbon content in steel in the set interval at the turn-down of the converter.

Keywords: identification algorithm, algorithm of dual-mode control, closed dynamic system, mathematical modeling, control action, model parameters, "critical" point, oxygen-converter process, informative data.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-2-138-141

REFERENCES

1. Myshlyaev L.P., Ageev D.A. Identifier synthesis in the form of closed dynamic systems. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 60–62. (In Russ.).
2. Myshlyaev L.P., Ageev D.A., Venger K.G. etc. Identifier numerical investigations on the basis of closed dynamic systems. *Vestnik KemGU*. 2011, no. 4, pp. 259–263. (In Russ.).
3. Fel'dbaum A.A., Butkovskii A.G. *Metody teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Theory methods of automated control]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 744 p. (In Russ.).
4. Avdeev V.P., Aizatulov R.S., Myshlyaev L.P. etc. *Sposoby rascheta mass materialov konverternogo protsessa* [Ways of material mass calculation of a converter process]. Moscow: Metallurgiya. 1994, 192 p. (In Russ.).
5. Yavoiskii V.I. *Teoriya protsessov proizvodstva stali* [Theory of steel production]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 792 p. (In Russ.).
6. Filippov S.I. *Teoriya kriticheskikh kontsentratsii* [Theory of critical concentrations]. In: *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov proizvodstva stali* [Physical and chemical basis of steel production]. Moscow: Nauka, 1979, pp. 79–87. (In Russ.).
7. Iida Yoshiharu, EmotoKanji, OgawaMasakatsu, MasudaYasuo, OnishiMassayuki, YamadaHirosuke. Fully Automatic Blowing Technique for Steelmaking Furnace. *Kawasaki Steel Giho*, 1983, 15, no. 2, p. 126 – 131.
8. Oiks G.N., Ioffe Kh.M. *Proizvodstvo stali (raschety)* [Steel production (calcula-tions)]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 480 p. (In Russ.).
9. Kocho V.S., Bogushevskii V.S., Sorokin N.A. Mathematical description and algorithm of converter melting control. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 5, pp. 41–11. (In Russ.).
10. Zaplowicz W., Stachowicz M. Control of BOF steelmaking in the conditions of incomplete information using the static mathematical model. *Zesz. Nauk. PSw. Clek*. 1981, no. 8, pp. 53–68.
11. Varkey G. Process automation in steel melting shop-from static modeling to expert systems. *Electron.-Inf. and Plann*. 1989. 17, no. 1, pp. 19–26.
12. Turkenich D.I. *Upravlenie plavkoi stali v konvertere* [Steel melting control in a converter]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 360 p. (In Russ.).
13. Avdeev V.P., Zel'tser S.R., Kartashov V.Ya., Kiselev S.F. *Naturno-matematicheskoe modelirovanie v sistemakh upravleniya: Ucheb. posobie* [Full-scale mathematical modeling in control systems: Manual]. Kemerovo: KemGU, 1987, 85p. (In Russ.).
14. Avdeev V.P. On the basis of full-scale mathematical modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979, no. 6, pp. 131–135. (In Russ.).
15. Volovich M.I., Avdeev V.P., Parparov Ya.G. *Kontrol' i otsenivanie konverternoi plavki po kosvennym parametram* [Control and estimation of converter melting by the indirect parameters]. Kemerovskoe kn. izd-vo, 1989, 124 p.

Acknowledgements. The work is supported by the grant of RFBR according to the project no.15-07-01972.

Information about the authors:

L.P. Myshlyaev, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Automation and Information Systems"*

D.A. Ageev, *Cand. Sci. (Eng.), Engineer of Laboratory "Research Systems of Technical Objects"* (Now_dm@mail.ru)

S.V. Chernyavskii, *Engineer of the Laboratory "Research Systems of Technical Objects"*

Received 26 October, 2015