

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 658.511:330.4

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-121-126

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Парсункин Б.Н., Сухоносова Т.Г., Полухина Е.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): получение достоверной информации и сокращение времени определения итоговых качественных, производственных или экономических показателей, характеризующих эффективность мероприятия по совершенствованию производственного процесса, представляет актуальную проблему для принятия обоснованного решения о полезности проведенного мероприятия. **Цель работы:** требуется разработать и обосновать методику определения показателя эффективности проводимого мероприятия при действии случайных возмущений на производственный процесс. **Используемые методы:** методика основана на определении интегральной оценки отклика исследуемого процесса на тестирующее входное воздействие. Переключающая функция тестирующего сигнала сформирована в соответствии с ортогональной функцией Уолша, порядок которой зависит от вида случайных возмущений, влияющих на исследуемый процесс. **Новизна:** разработана и обоснована методика оценки эффективности производственного или технологического процесса. Уникальные свойства функции Уолша, совместно с интегральной оценкой показателя эффективности, позволяют подавить влияние любых случайных технологических или производственных факторов. Другим немаловажным преимуществом предлагаемой методики является сокращение времени на сравнительную оценку двух одновременно проводимых модернизаций, стратегий или подходов к управлению производственным процессом. **Результаты:** приведены результаты практического применения предлагаемого метода в реальных производственных условиях при оценке эффективности проводимого мероприятия по совершенствованию системы автоматического управления тепловым режимом методической печи широкополосного стана горячей прокатки при нагреве непрерывно-литых слябовых заготовок. Целью модернизации являлось уменьшение себестоимости нагрева за счет энергосбережения, ввиду этого эффективность от внедрения новой системы автоматического управления тепловым режимом печи оценивалась по удельному расходу природного газа. Основными случайными факторами, влияющими на расход топлива, в конкретном технологическом процессе были неравномерная производительность печи и доля металла горячей посадки. Для исключения влияния указанных возмущений была выбрана четвертая степень аппроксимирующего полинома переключающей функции и общая продолжительность эксперимента в один месяц. Внедрение новой системы автоматического управления оказалось оправданным, так как было достигнуто снижение удельного расхода природного газа на 2,7%. **Практическая значимость:** предлагаемая методика оценки итоговых показателей эффективности двух противопоставляемых способов по совершенствованию качественных, производственных или экономических показателей позволяет оперативно получать достоверную информацию и принимать обоснованные решения о целесообразности модернизации любого производственного процесса или научно-исследовательских работ.

Ключевые слова: интегральная оценка, показатель эффективности, функция Уолша, ортогональная функция Уолша, переключающая функция.

Введение

Получение достоверной и оперативной информации об изменении итоговых показателей эффективности производимого мероприятия или научно-исследовательской работы по совершенствованию конкретного производственного процесса представляет актуальную проблему для принятия обоснованного решения о полезности проведенного мероприятия [1].

Применяемая в настоящее время типовая мето-

дика определения показателей эффективности в условиях реального производства требует значительного времени для реализации, не учитывает объективного влияния случайных технологических и организационных факторов на определяемый показатель эффективности и не обладает достоверной избирательностью для каждого из нескольких одновременно проводимых мероприятий. Поэтому в данной работе предлагается методика лишенная указанных недостатков. Суть решаемой проблемы представлена на схеме, изображенной на **рис. 1**.

© Парсункин Б.Н., Сухоносова Т.Г., Полухина Е.И., 2016

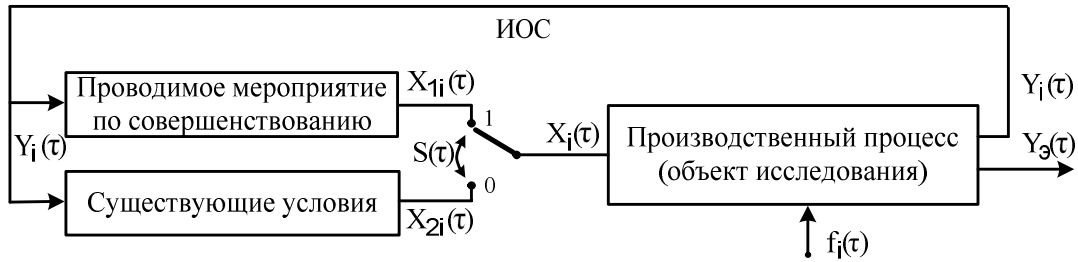


Рис. 1. Схема реализации предлагаемой методики достоверной оценки результата проводимого мероприятия по повышению показателей производственного процесса

Переключающая функция $S(\tau) \in (0;1)$ определяет режим функционирования производственного процесса (объекта исследования) с учетом условия

$$X_i(\tau) = \begin{cases} X_{1i}(\tau) & \text{при } S(\tau) = 1; \\ X_{2i}(\tau) & \text{при } S(\tau) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $X_{1i}(\tau)$ – воздействия на производственный процесс с учетом проводимого мероприятия; $X_{2i}(\tau)$ – воздействия на процесс без учета проводимого мероприятия; f_i – внешние случайные технологические и организационные возмущения, воздействующие на производственный процесс в период времени проведения исследования; $Y_3(\tau)$ – определяемый показатель эффективности производственного процесса; ИОС – информационная обратная связь с объектом; $Y_i(\tau)$ – параметры информационной связи.

Теоретическое обоснование методики

Контролируемое итоговое значение показателя эффективности $Y_3(\tau)$ можно представить в виде

$$Y_3(\tau) = Y_0 + S(\tau) \cdot \Delta Y_3 + Y_C(\tau) \quad (2)$$

при $0 \leq \tau \leq T$,

где τ – текущее время; Y_0 – постоянная составляющая $Y_3(\tau)$, определяемая значением принятого показателя эффективности при отсутствии проводимого мероприятия; $S(\tau)$ – переключающая функция; ΔY_3 – определяемая величина, представляющая собой изменение величины $Y_3(\tau)$, обусловленная влиянием на производственный процесс проводимого мероприятия; $Y_C(\tau)$ – случайная составляющая $Y_3(\tau)$, определяемая влиянием технологических и организационных возмущений; T – интервал времени, в течение которого необходимо определить эффективность проводимого мероприятия по сравнению с существующими условиями.

Для определения объективной итоговой

оценки величины ΔY_3 используем интегральную оценку $R(\tau)$ в соответствии с выражением

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T Y_3(\tau) \cdot \Psi(\tau) d\tau \quad (3)$$

при $0 \leq \tau \leq T$,

где $\Psi_n(\tau)$ – сигнум-функция переключения знака интегрирования, принимающая на интервале времени $(0, T)$ значения

$$\Psi_n(\tau) \in (+1, -1). \quad (4)$$

В соответствии со схемой (см. **рис. 1**) необходимо согласовать переключающую функцию $S(\tau)$ с функцией $\Psi_n(\tau)$ во времени в соответствии с условием

$$S(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{при } \Psi_n(\tau) = -1; \\ 1 & \text{при } \Psi_n(\tau) = +1. \end{cases} \quad (5)$$

Для функции $\Psi_n(\tau)$ потребуем выполнения условия

$$\int_0^T \Psi_n(\tau) d\tau = 0. \quad (6)$$

Условие (6) означает, что на интервале времени $(0, T)$ общее время влияния на процесс проводимого мероприятия равно общему времени функционирования процесса при отсутствии мероприятия.

Подстановка (2) в (3) с учетом условий (4) и (6) позволяет получить выражение

$$R(\tau) = 0,5 \Delta Y_3(\tau) + r_C(T),$$

если $r_C(T) = \frac{1}{T} \int_0^T Y_C(\tau) \cdot \Psi_n(\tau) d\tau, \quad (7)$

где $r_C(T)$ – погрешность, определения $\Delta Y_3(\tau)$, обусловленная влиянием случайных технологических и организационных возмущений на производственный процесс.

Для получения объективного (достоверного) значения ΔY_{Σ} необходимо функцию $\psi_n(\tau)$ определить таким образом, чтобы величина случайной составляющей $r_C(T)$ была по абсолютной величине минимально возможной (практически нулевой). Это обеспечивается выполнением второго условия определения искомой функции $\psi_n(\tau)$ в виде

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T Y_C(\tau) \cdot \Psi_n(\tau) d\tau \right| \rightarrow \min. \quad (8)$$

Изменение траектории величины $Y_C(\tau)$ во времени на интервале $(0, T)$ в общем случае можно представить в виде полиномиальной зависимости

$$Y_C(\tau) = \sum_{k=0}^n a_k \cdot \tau^k + \delta_n(\tau) \quad (9)$$

при $0 \leq \tau \leq T$,

где n – максимальная степень аппроксимирующего полинома; $\delta_n(\tau)$ – функция ошибки представления случайного процесса $Y_C(\tau)$ в виде аппроксимирующего полинома n -степени; a_k – постоянные коэффициенты полинома, полученные в результате решения задачи с использованием метода наименьших квадратов при $k=0, 1, \dots, n$ и выполнении условия

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T [\delta_n(\tau)]^2 d\tau \right| \rightarrow \min. \quad (10)$$

С учетом (9) значение $r_C(T)$ можно представить в виде

$$r_C(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta_n(\tau) \cdot \Psi_n(\tau) d\tau + \frac{1}{T} \int_0^T \sum a_k \tau^k \cdot \Psi_n(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Откуда следует, что для практического исключения влияния случайных возмущений на величину ΔY_{Σ} необходимо от функции $\psi_n(\tau)$ потребовать выполнения третьего условия

$$\int_0^T \tau^k \cdot \Psi_n(\tau) d\tau = 0 \quad (12)$$

при $k = 1, 2, 3, \dots, n$.

Таковыми отличительными и уникальными свойствами обладают ортогональные (знаковые) синус функции Уолша [2, 3] вида

$$\Psi_n(\tau) = \prod_{k=1}^{n+1} \text{sign} \left(\sin \frac{2^k \pi \cdot \tau}{T} \right) \quad (13)$$

при $0 \leq \tau \leq T$,

где n – степень аппроксимирующего полинома функции $Y_C(\tau)$.

В качестве конкретного примера наличия уникальных свойств функции Уолша рассмотрим реализацию условия (12) в виде выражения

$$\int_0^T \tau^n \cdot \prod_{k=1}^{n+1} \text{sign} \left(\sin \frac{2^k \pi \cdot \tau}{T} \right) d\tau = 0 \quad (14)$$

при $0 \leq \tau \leq T, n = 0, 1, 2$.

Вид переключающих функций $\psi_n(\tau)$ и соответствующих подынтегральных функций $Y_C(\tau)$ при $n=0, 1, 2$ представлен на **рис. 2**.

Например, при $n=2$ выражение (14) составит (см. **рис. 2**):

$$\begin{aligned} \int_0^T \tau^2 \prod_{i=1}^3 \text{sign} \left(\sin \frac{2^i \pi \cdot \tau}{T} \right) d\tau &= \int_0^{T/8} \tau^2 d\tau - \\ &- \int_{T/8}^{3T/8} \tau^2 d\tau + \int_{3T/8}^{4T/8} \tau^2 d\tau - \int_{4T/8}^{5T/8} \tau^2 d\tau + \\ &+ \int_{5T/8}^{7T/8} \tau^2 d\tau - \int_{7T/8}^T \tau^2 d\tau = \frac{1}{3} \left(\frac{T}{8} \right)^3 (816 - 816) = 0. \end{aligned}$$

Значит, погрешность компенсации влияния возмущений на величину ΔY_{Σ} с учетом (14) будет равна

$$r_C(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta_n(\tau) \cdot \Psi_n(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Функция $\delta_n(\tau)$ по условию (10) на интервале $(0, T)$ является знакопеременной функцией и не является линейной комбинацией $\psi_n(\tau)$. Это позволяет обоснованно принять гипотезу о достаточно малой погрешности определения достоверного значения ΔY_{Σ} при правильном выборе значения n для конкретного случая [4, 5].

В соответствии с **рис. 2** функция $\psi_n(\tau)$ является знакопеременной, в которой количество переключений с увеличением n возрастает по степенной зависимости. Продолжительность общего интервала времени T определяется принятой величиной n и зависит от продолжительности постоянного промежутка времени τ_1 , за который в производственном процессе осуществляется итоговое определение качественных, производственных и экономических показателей эффективности, например смена, сутки (см. **рис. 2**).

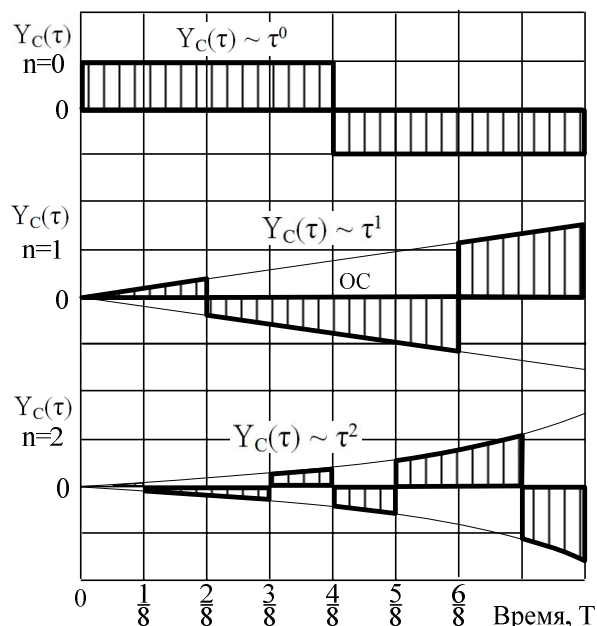
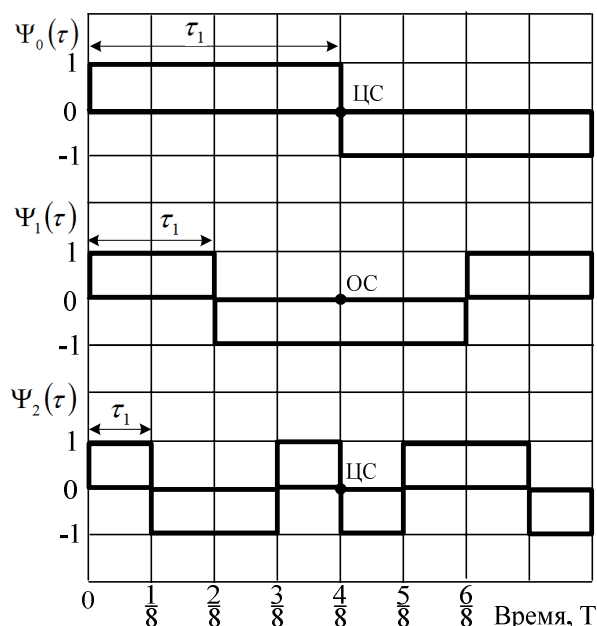


Рис. 2. Вид переключающей функции $\psi_n(\tau)$ для степеней полиномов $n=1,2,3$ (а) и соответствующие подынтегральные функции $Y_C(\tau)$ (б)

Количество необходимых промежутков времени τ_1 определяется зависимостью вида $m = 2^{n+1}$, где m – количество переключений функции $\psi_n(\tau)$.

Проверка эффективности методики в производственных условиях

Проверка достоверности рассматриваемой методики объективного определения показателей двух противопоставляемых мероприятий в реальных производственных условиях осуществлена при определении эффективности разработанной по договору о НИР системы централизованного микропроцессорного автоматизированного управления тепловым режимом методической печи на ШСГП ОАО «ММК» по сравнению с существующей на печи системой управления [6].

В качестве определяемого параметра эффективности двух противопоставляемых систем автоматического управления тепловым режимом на печи принята величина удельного количества природного газа, затрачиваемого на нагрев одной тонны металла.

По результатам предварительно проведенного анализа научно-технической литературы и экспериментально были определены два основных случайных фактора, влияющих на определяемый параметр: суточное производство стана (т/сутки) и объем металла горячего посада (%) [7, 8].

Для устранения влияния выявленных главных случайных факторов на определяемый параметр эффективности при использовании методики были приняты величины: продолжительность $\tau_1 = 1$ сут; степень аппроксимирующего

полинома $n = 4$; значит, количество переключений $m = 2^5 = 32$ и продолжительность общего времени $T = 32$ дня. Продолжительность работы каждой системы – по 16 сут. Это определяет оперативность методики.

Календарный график переключения способов управления тепловым режимом в процессе определения показателей эффективности каждого из противопоставляемых способов представлен на рис. 3.

При практическом использовании рассматриваемой методики следует учитывать, а при необходимости и использовать, дополнительные уникальные свойства ортогональных функций Уолша (7):

- 1) для сокращения продолжительности периода определения показателей сравнительной эффективности двух противопоставляемых мероприятий не следует принимать значения $n > 5$;
- 2) переключающая функция $\psi_n(\tau)$ может быть получена из функции $\psi_{n-1}(\tau)$ (см. рис. 2) с учетом следующего условия: при n -четных величин с использованием принципа центральной симметрии (ЦС), а при n -нечетных с использованием принципа осевой симметрии (ОС);
- 3) компенсирующие свойства функции $\psi_n(\tau)$ полностью сохраняются и при функции $-\psi_n(\tau)$ на всем интервале времени $(0, T)$;
- 4) уникальные компенсирующие свойства ортогональной функции Уолша $\psi_n(\tau)$ обеспечивают компенсацию всех возмущений, траектории которых можно аппроксимировать полиномами степеней от 0 до n .



Рис. 3. Календарный график переключения способов управления тепловым режимом методической печи

В результате использования предлагаемой методики, исключая влияние случайных факторов на достоверную оценку показателей эффективности двух противопоставляемых мероприятий, получены следующие итоговые показатели.

При использовании существующего способа автоматического управления тепловым режимом методической печи:

- нагрето в печи металла 34 307 т;
- затрачено природного газа 2 010 640 м³;
- нагрето металла горячего посада 28 387 т;
- удельное количество природного газа 58,60 м³/т;

При использовании разработанной системы централизованного управления тепловым режимом печи:

- нагрето в печи металла 34 286 т;
- затрачено природного газа 1 953 680 м³;
- нагрето металла горячего посада 28 429 т;
- удельное количество природного газа 56,98 м³/т;

При работе микропроцессорной системы централизованного автоматического управления достигнуто снижение удельного расхода природного газа на 1,63 м³/т, или на 2,68%.

Разница в количестве нагретого металла составляет всего 22 т, что составляет полторы заготовки. Разница в количестве нагретого металла горячего посада составляет 42 т. Следовательно, мероприятие полезно и целесообразно для использования.

Заключение

Предлагаемая методика оценки итоговых показателей эффективности двух противопоставляемых способов совершенствования показателей производственного процесса позволяет оперативно получать достоверную информацию и принимать обоснованные решения о целесообразности использования нового мероприятия, предлагаемого для улучшения качественных, производственных и экономических показателей любого производственного процесса и проводимых научно-исследовательских работ [8].

Список литературы

1. Андреев С.М. Решение задач оптимального нагрева с минимизацией затрат топлива на нагрев // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2001. С. 54–61.
2. Ефимов А.В. Математический анализ: учеб. пособие для вузов. Ч. 1. М.: Высш. шк., 1980. 427 с.
3. Голубов Б.И., Ефимов А.В., Скворцов В.А. Ряды и преобразования Уолша: теория и применения. М.: Наука, 1987. 344 с.
4. Казакевич В.В., Родов А.Б. Системы автоматической оптимизации. М.: Энергия, 1977. 288 с.
5. Формирование тестирующих сигналов для идентификации теплоэнергетических объектов управления / Парсункин Б.Н., Обухов Г.Ф., Леднов А.В. и др. // Изв. вузов. Теплоэнергетика. 1988. №6. С. 65–70.
6. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю. Исследование энергосберегающего режима нагрева непрерывнолитых заготовок // Сталь. 2007. №4. С. 53–56.
7. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металлургия, 1962. 557 с.
8. Арутюнов В.В., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.

Материал поступил в редакцию 16.06.15.

A METHOD OF EVALUATING THE PERFORMANCE OF A PRODUCTION PROCESS IMPROVEMENT ACTION

Boris N. Parsunkin – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-84-32. E-mail: pksu035@gmail.com

Tatyana G. Sukhonosova – Assistant Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Phone: +7(3519)29-85-58. E-mail: tgobuhova@gmail.com

Ekaterina I. Polukhina – Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tgobuhova@gmail.com

Abstract

Problem Statement (Relevance): To make a justifiable decision about the relevance of production process improvement action taken it is important to have reliable data and to save time on the identification of quality, production and economic performance indicators of such action. **Objectives:** It is necessary to develop and justify a method of evaluating the action performance with random disturbances affecting the production. **Methods Applied:** The method is based on integral estimation of the response of the process studied to the input disturbance. The switching function of the test signal is generated based on the Walsh function, the order of which depends on the type of random disturbances affecting the process of interest. **Originality:** The study helped develop and justify a process performance evaluation method. The unique features of the Walsh function combined with the integral performance estimation technique help eliminate the effect of any random process factors. Another important advantage of the proposed method is a reduced time that is required for the comparative analysis of two simultaneous upgrades, strategies of or approaches to production management. **Findings:** The article describes the results of the practical application of the proposed method. The method was applied to analyse the performance of an action aimed at enhancing the performance of a control system which controls the slab reheating furnace within a hot wide-strip mill. This optimization was aimed at reducing the heating cost due to energy saving. The performance of the upgraded system was analysed based on the specific consumption of natural gas. The main random factors affecting the fuel gas consumption included an unbalanced performance of the furnace and the percent of the hot charge. To eliminate the effect of the above mentioned disturbances the 4th degree polynomial approximation was chosen with the total experiment duration of one month. The new system proved to be cost-effective as it enabled a 2.7% decrease in the specific consumption of natural

gas. **Practical Relevance:** The proposed method of estimating the performance of two opposing approaches to enhancing the quality, production and economic performance indicators provides quick access to reliable data and supports optimization decisions with regard to any production process or research project.

Keywords: Integral estimation, performance evaluation, Walsh function, switching function.

References

1. Andreev S.M. Optimisation of the heating process with minimized fuel costs. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v metallurgii: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Production automation in steel industry: Research papers]. Magnitogorsk: Publishing house of the Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2001, pp. 54-61.
2. Efimov A.V. *Matematicheskii analiz: uchebnoe posobie dlia vuzov. ch.1* [Mathematical analysis: University student's guide. P.1]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 427 p.
3. Golubov B.I., Efimov A.V., Skvortsov V.A. *Riady i preobrazovaniia Uolsha: teoriya i primeneniya* [Walsh rows and transformations: Theory and Application]. Moscow: Nauka, 1987, 344 p.
4. Kazakevich V.V., Rodov A.B. *Sistemy avtomaticheskoi optimizatsii* [Automatic optimization systems]. Moscow: Energiya, 1977, 288 p.
5. Parsunkin, B.N., Obukhov G. F., Lednov A.V. et al. Creating test sinusoidal inputs for the identification of thermal power objects. *Izvestiia vuzov. Teploenergetika* [Proceedings of universities. Thermal power engineering]. 1988, no. 6, pp. 65-70.
6. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskii D.Yu. Investigation of the energy efficient cast billet heating mode]. *Stal'* [Steel], 2007, no. 4, pp. 53-56.
7. Tayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 557 p.
8. Arutyunov V.V., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoi raboty promyshlennykh pechei* [Mathematical modeling of the thermal performance of industrial furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 239 p.

Received 16/06/15

Парсункин Б.Н., Сухонослова Т.Г., Полухина Е.И. Методика оценки эффективности мероприятия по совершенствованию показателей производственного процесса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 121–126. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-121-126

Parsunkin B.N., Sukhonosova T.G., Polukhina E. I. A method of evaluating the performance of a production process improvement action. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 121–126. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-121-126