

Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 5 (104). С. 22–34.
Cherepovets State University Bulletin, 2021, no. 5 (104), pp. 22–34.

Научная статья

УДК 681.58:681.5.015.3

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-5-104-2>

Экстремально-оптимизирующее автоматизированное управление нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа

**Борис Николаевич Парсункин¹, Сергей Михайлович Андреев²,
Елена Юрьевна Мухина^{3✉}**

^{1, 2, 3}Магнитогорский государственный
технический университет им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия,

¹promkim@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

²andreev.asc@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

³mukhinaeu@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2839-4200>

Аннотация. В статье изложена стратегия перспективного экстремально оптимизирующего высокопроизводительного энергосберегающего универсального поискового управления нагревом непрерывнолитых слэбовых заготовок в условиях нестационарного по производительности режима работы широкополосного стана горячей прокатки с целью гарантированно-го нагрева металла. Реализованная перспективная концепция поискового экстремально-оптимизирующего управления производственными процессами рассмотрена на конкретном примере эффективного гарантированного управления тепловым режимом в печах проходного типа. Рассмотрены оптимальные вариационные и поисковые экстремальные методы управления тремя взаимосвязанными тепловыми процессами: распределением топлива по длине и по времени в рабочем пространстве печи; сжиганием топлива с целью достижения максимально возможного теплового эффекта; удалением продуктов сгорания путем уменьшения потерь тепла с подсосами и выбиваниями. В качестве контролируемого и регулируемого параметра используется температура поверхности нагреваемых заготовок. Это позволило повысить оперативность предлагаемого экстремально-оптимизирующего управления, а также реализовать способ автоматического контроля реального теплового состояния каждой заготовки перед выдачей из печи с целью предотвращения возможности появления на стане недогретой заготовки, а также с целью прогнозирования ожидаемой температуры раската.

Ключевые слова: экстремально-оптимизирующее управление, нестационарный режим, гарантированный нагрев, энергосбережение, поиск экстремума, температура поверхности, непрерывнолитые заготовки

Для цитирования: Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Мухина Е. Ю. Экстремально-оптимизирующее автоматизированное управление нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 5 (104). С. 22–34. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-5-104-2>.

Extreme-optimal automated control for concast billet heating in through-feed furnaces

Boris N. Parsunkin¹, Sergey M. Andreev², Elena Yu. Mukhina^{3✉}

^{1,2,3}Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,

¹promkim@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>

²andreev.asc@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

³mukhinaeu@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2839-4200>

Abstract. This article deals with a strategy of advanced extreme-optimal high-output energy-saving uniform exploratory control for the heating of concast slabs under the broad hot-rolling mill working modes with unsteady outputs to achieve guaranteed metal heating. The implemented advanced extreme-optimal exploratory control development strategy for production processes is analyzed using the specific example of efficient guaranteed optimum control of the heating parameters in through-feed furnaces. We review the best variational and exploratory extreme control methods for three interrelated heating processes: the distribution of fuel along the length of the furnace body and over time; the optimal control of fuel-burning to obtain the best calorific effect possible; the optimum heat-saving control for combustion product ejection through the reduced heat losses due to suction and knocking out. The operability and feasibility of the suggested extreme-optimal control are achieved using the simplified dynamic heat exchange model along the “fuel consumption” – “billet center temperature” channel with the surface temperature of the heated billets used as the main monitoring and control parameter. We analyzed the efficient method of automated autonomous positive control for the real thermal condition of each of the billets before they are ejected from the furnace to prevent the possibility of feeding underheated billets to the rolling mill, as well as emergencies in the mill. This system provides a forecast for the expected breakdown temperature for each of the billets before they are ejected from the furnace under the energy-saving operational mode. We present the results of the practical implementation of the extreme-optimal control for metal heating at four Russian high-output rolling mills that have a significant economic effect with minimum costs of software (digital) implementation of the suggested control concept.

Keywords: extreme-optimal control, non-standard mode, guaranteed heating, energy saving, extremum seeking, surface temperatures, concast billets

For citation: Parsunkin B. N., Andreev S. M., Mukhina E. Yu. Extreme-optimal automated control for concast billet heating in through-feed furnaces. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 5 (104), pp. 22–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-5-104-2>.

Введение

Одной из возможных важных причин отсутствия заметного улучшения результатов эффективности производственной деятельности является неправильный выбор концепции (стратегии) развития оптимизации управления.

Часто ошибочно принятая и директивно реализуемая стратегия оптимизации управления, ориентированная только на максимальное снижение непроизводственных затрат материальных и энергетических ресурсов, губительна для процесса, подвергаемого изменению. Предельно минимальные (нулевые) затраты будут обеспечены только при полном прекращении всех действий.

Перспективной стратегией оптимизации управления производственным процессом является стратегия, сформулированная следующим образом: необходимо минимизировать непроизводственные затраты энергетических и материальных ресурсов при безусловном увеличении объема и повышении качества производимого продукта. Последнее указанное требование часто не учитывается.

Достижение поставленной цели возможно только при использовании поискового экстремально-оптимизирующего управления производственным процессом. Его конкретная реализация рассмотрена на примере автоматизированного управления нагревом непрерывнолитых заготовок из труднодеформируемых марок стали в методических печах широкополосных станов горячей прокатки (далее – ШСГП) при производстве широкополосного листового проката для трубной, оборонной, судостроительной и других отраслей промышленности при минимальных удельных затратах топлива и потерях металла при окислении.

Поскольку в металлургии общие затраты топлива на нагрев составляют более 20 %, а доля потерь металла от окисления – более 40 % себестоимости нагрева, это делает решение поставленной задачи актуальным и экономически значимым.

Текущий результирующий показатель эффективности автоматического экстремально-оптимизирующего управления нагревом металла содержит три не одинаковые по масштабам составляющие, характеризующие успешность управления отдельными взаимосвязанными теплотехническими процессами. Это приводит к необходимости синтеза системы с несколькими сопряженными контурами управления для достижения поставленной цели¹.

Приоритетное влияние на эффективность оптимального ресурсосберегающего управления оказывает контур оптимизирующего управления распределением топлива по длине рабочего пространства методической печи. Вторым по значимости фактором, подчиненным первому, является оптимизация управления процессом сжигания подаваемого в рабочее пространство топлива с целью достижения максимально возможного теплового эффекта и максимально возможной температуры рабочей зоны. Третий фактор, подчиненный двум ранее названным, – оптимизация управления отводом продуктов сгорания из рабочего пространства, которое обеспечивает минимально возможные тепловые потери с выбиваниями горячих продуктов сгорания из рабочей области и потерями, связанными с подсосами холодного атмосферного воздуха в печь.

Основной целью эффективной реализации экстремально-оптимизирующего энергосберегающего высокопроизводительного автоматического управления нагревом металла в печах ШСГП является гарантированный нагрев непрерывнолитых заготовок до требуемого заданного температурного состояния за установленное (определяемое текущей производительностью стана) время нагрева в условиях нестационарного режима работы ШСГП.

¹ Гинсберг К. С., Генкин А. Л. К основам научной методологии структурной идентификации для цели создания реальных систем автоматического управления с требуемыми свойствами // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 3 (84). С. 24–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-3-84-3>.

Если режим работы прокатного стана нестационарен по производительности (см. рис. 1)¹ – доля подачи в печи непрерывнолитых партий заготовок с температурой свыше 500 °С² изменяется от 42 до 80 %³, – то практическая реализация⁴ высокопроизводительного гарантированного энергосберегающего экстремально-оптимизирующего управления нагревом металла представляет собой сложную проблему⁵.

Следует учитывать, что потери даже при кратковременных простоях ШСГП по причине отсутствия нагретого металла значительно превышают экономию от снижения затрат топлива на нагрев. По этой причине в качестве типового и конструктивно реализованного принят режим достижения максимальной производительности печи, но он неоправданно используется в режимах длительной работы ШСГП с пониженной производительностью (см. рис. 1), приводя к излишним затратам топлива и увеличению потерь металла с окислением.

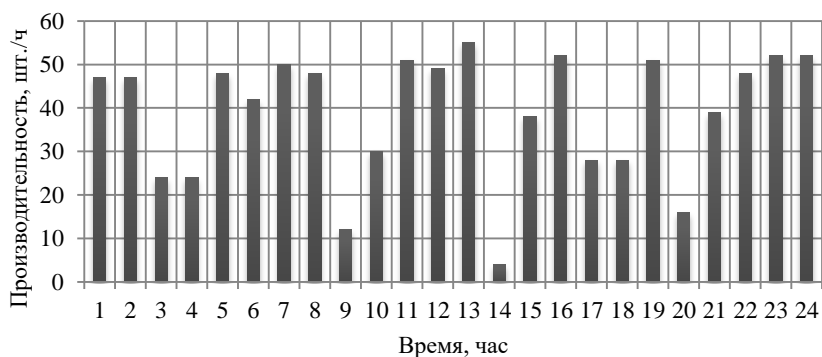


Рис. 1. Изменение часовой производительности ШСГП с реверсивной черновой клетью в течение суток

Объективно следует отметить, что переход на энергосберегающий режим управления нагревом при резком увеличении производительности ШСГП (см. рис. 1) по-

¹ Парсункин Б. Н., Андреев С. М. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывнолитой заготовки в методической печи с шагающими балками // *Сталь*. 2003. № 1. С. 71–74.

² Лукин С. В., Левашев К. Ю., Збродов А. А., Кибардин А. Н., Малыгин Л. Л. Системная и функциональная модели оценки теплового состояния стальной заготовки на технологической линии «МНЛЗ – нагревательная печь» // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2018. № 5 (86). С. 8–16. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-5-86-1>.

³ Лукин С. В., Шестаков Н. И., Павлов М. В., Левашев К. Ю., Збродов А. А. Математическое моделирование и совершенствование тепловой обработки заготовок квадратного сечения на технологической линии «Сортовая МНЛЗ – Туннельный термос – Нагревательная печь» // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2021. № 1 (100). С. 41–55. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-3>.

⁴ Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. Москва: Наука, 1975. 568 с.

⁵ Малый С. А. Некоторые оптимальные режимы нагрева металла // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1966. № 9. С. 175–179.

вышает вероятность появления на стане недогретой заготовки и возникновения недопустимой аварийной ситуации.

Основная часть

Общая структурная схема автоматического экстремально-оптимизирующего управления нагревом металла в печах проходного типа

В рамках существующей конструкции рабочего пространства методических печей (при наличии зон выдержки) практическая реализация энергосберегающего экстремально-оптимизирующего управления нагревом не должна быть причиной повышенного риска появления на стане недогретой заготовки, когда общее фактическое время нагрева оказалось меньше расчетного, использованного в процессе установления оптимальной температурной траектории нагрева.

Нежелательны и случаи, при которых время нагрева, определенное в ходе расчета, оказывается меньше фактического. Вместе с тем эффективность энергосберегающего управления резко уменьшается за счет дополнительного расхода топлива на поддержание высокой температуры уже нагретого металла и возросших потерь металла с окислением при высокой температуре.

Общая структурная схема программной реализации автоматической системы экстремально-оптимизирующего управления нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа представлена на рис. 2 и включает ряд подсистем.

Подсистема слежения за перемещением каждой заготовки использует данные о числе строго фиксированных по длине перемещений подвижных шагающих балок с момента посадки очередной заготовки в печь до появления ее из печи.

Учитывая информацию с датчиков температуры поверхности в фиксированных точках в отапливаемых зонах печи и текущую координату положения каждой заготовки во времени и по длине рабочего пространства, *подсистема математической модели нагрева* осуществляет расчет текущего температурного состояния заготовок, находящихся в рабочей области нагревательной печи¹.

Подсистема определения начального теплового состояния каждой подаваемой на нагрев непрерывнолитой заготовки, опираясь на информацию о температуре поверхности и времени пребывания этой заготовки в утилизационной (неотапливаемой) зоне печи, вычисляет начальное температурное состояние каждой заготовки $t^{\circ}(x, \tau)$ перед входом в отапливаемые зоны нагрева.

¹ Андреев С. М., Парсункин Б. Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. 376 с.

пользовании вариационного принципа максимума Л. С. Понтрягина¹ с учетом всех конструктивных и технологических ограничений².

Подсистема автоматического регулирования температуры поверхности осуществляет управление подачей топлива в зоны нагрева с целью стабилизации этой температуры.

Подсистема автономного независимого контроля теплового состояния нагреваемых заготовок и прогнозирования температуры раската этих заготовок перед выдачей из печи обеспечивает дополнительный автоматический контроль температурного состояния нагреваемого металла, предотвращая несанкционированное появление на ШСГП недогретых заготовок.

Подсистема оптимизации управления процессом сжигания топлива, подаваемого в зоны интенсивного нагрева, осуществляет экстремально-оптимизирующее управление подачей воздуха в эти зоны, позволяя сжигать топливо с максимально возможным температурным эффектом³.

*Подсистема оптимизации управления газодинамическим режимом рабочего пространства*⁴ обеспечивает поисковое экстремально-оптимизирующее управление отводом продуктов сгорания из рабочей области посредством минимизации тепловых потерь с подсосами и выбиваниями⁵.

Подсистема стабилизации температуры раската (температуры поверхности полосы после черновой группы клетей ШСГП) осуществляет коррекцию заданной оптимальной температурной траектории и заданной конечной температуры заготовок, выдаваемых из различных печей ШСГП.

Опыт и особенности практической производственной реализации экстремально-оптимизирующего управления

В нагревательных печах современных ШСГП одновременно нагреваются несколько сотен непрерывнолитых заготовок, различающихся по размерам, теплофизическим свойствам и начальному тепловому состоянию, прокатываемых на разные по толщине полосы. В идеале для каждой подаваемой на нагрев заготовки должно быть предусмотрено индивидуальное оптимальное распределение тепловой нагрузки по длине отапливаемой печи. Однако это условие невыполнимо.

Эффективность полезного использования тепловой энергии в нижних зонах меньше, чем в верхних, вследствие наличия водоохлаждаемых конструктивных эле-

¹ Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука, 1983. 393 с.

² Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. Москва: Наука, 1969. 408 с.

³ Андреев С. М., Парсункин Б. Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. 376 с.

⁴ Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ахметов У. Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2006. 198 с.

⁵ Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ишметьев Е. Н. Системы автоматической оптимизации управления технологическими процессами с запоминанием экстремума. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2015. 136 с.

ментов. По этой причине целесообразен дифференцированный (в зависимости от текущей производительности ШСГП) несимметричный способ подачи топлива. В нижние зоны топлива дифференцированно подается на 0–10 % меньше, чем в равно-расположенные верхние зоны.

Реализация дифференцированного несимметричного распределения путем использования принципа объемного пропорционирования расходов природного газа позволила уменьшить удельный расход условного топлива не менее чем на 1,3–1,5 % при сохранении требуемого качества нагрева.

При практическом осуществлении экстремально-оптимизирующего управления приоритетное значение имеет обоснованный выбор контролируемого температурного параметра, расчетная траектория которого должна оперативно поддерживаться во времени и по длине рабочего пространства с применением современных технических средств контроля и управления. Таким общепринятым температурным параметром является температура греющей среды (температура рабочего пространства) $t_{рп}(\tau)$, измеряемая платиносодержащими термопарами в массивных защитных карборундовых стаканах, обычно размещаемых в боковых стенах или на своде печи и погружаемых в рабочее пространство на 100–150 мм¹.

Целесообразность использования температуры поверхности $t_{пов}(\tau)$, а точнее поверхностного слоя окалины, для автоматического управления нагревом осознана давно². До настоящего времени широкому применению этого объективного параметра препятствует неоправданно преувеличенное, хотя и обоснованное, мнение о наличии значительной ошибки при оптическом измерении температуры «серой» поверхности через селективно излучающий слой продуктов сгорания в условиях влияния отраженного излучения огнеупорной кладки и факела.

Для повышения точности и объективности определения $t_{пов}(\tau)$ в процессе экстремально-оптимизирующего автоматического управления нагревом металла был разработан метод применения оптических пирометров для печей со следующими способами перемещения металла по длине: толкательным способом и способом с использованием шагающих балок.

Выбор $t_{пов}(\tau)$ для регулирования теплового режима на четырех высокопроизводительных станах позволил за счет оперативности, объективности и целесообразности автоматического управления режимом нагрева уменьшить на 3–6 кг/т удельный расход условного топлива при сохранении и даже увеличении средней температуры раската на каждом стане.

Для исключения возможности появления на стане недогретой заготовки при реализации экстремально-оптимизирующего управления режимом нагрева разработана автономная система программного инструментального контроля теплового состоя-

¹ Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Сухонослова (Обухова) Т. Г., Седельников С. В., Овчинников И. Ю. Опробование информационной системы контроля теплового состояния заготовок перед выдачей из методической печи // Сталь. 2006. № 12. С. 75–78.

² Малый С. А. Автоматизация методических печей. – Москва: Металлургия, 1962. – 104 с.

ния каждой второй в очереди на выдачу из печи нагреваемой заготовки¹. Одновременно выполняется прогнозирование ожидаемой температуры раската этой заготовки после черновых клетей ШСГП².

Экспериментальные траектории изменения во времени контролируемых параметров в зоне выдержки печи, управление тепловым режимом которой осуществляется с учетом экстремально-оптимизирующего метода, представлены на рис. 3, где $T_{rc}(t)$ – траектория температуры рабочего пространства, °С; $T_{пов}(t)$ – температура поверхности заготовки, °С; $V_r(t)$ – текущий расход топлива в томильную зону, м³/ч, $\Delta t = T_{изм}(t) - T_{расч}(t)$, где $T_{изм}(t)$ – температура раската, измеренная пирометром частично излучения, °С; $T_{расч}(t)$ – температура, рассчитанная в системе оценки температурного состояния с использованием датчика температуры полного излучения (радиационного пирометра ТЭРА-50), °С.

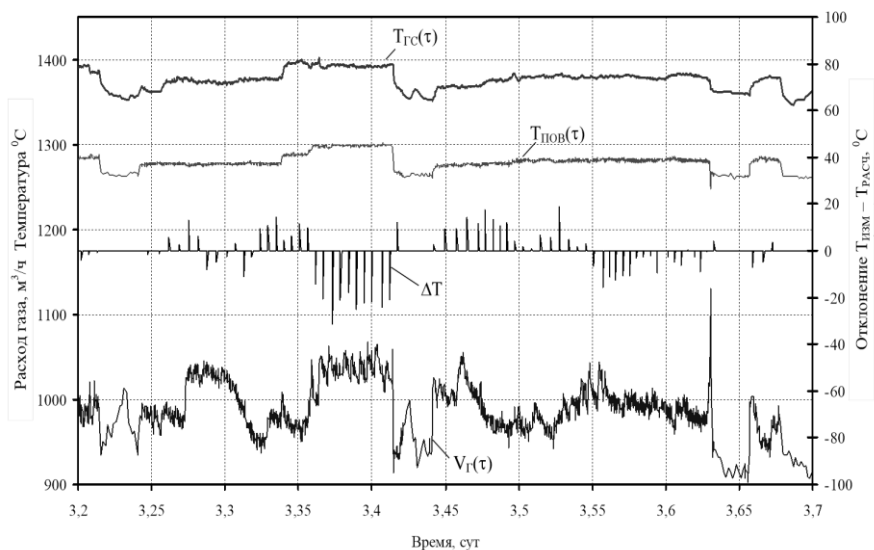


Рис. 3. Изменение во времени $T_{rc}(t)$, $T_{пов}(t)$, $\Delta t(t)$, $V_r(t)$ при работе системы инструментального контроля за тепловым состоянием заготовок, выданных из печи ШСГП

Экстремально-оптимизирующее управление процессом сжигания топлива за счет более оперативного и эффективного контроля расхода воздуха и учета нелинейной зависимости оптимального значения коэффициента расхода воздуха от расхода газа позволило уменьшить удельный расход условного топлива на печах ШСГП на 1,6–2,4 кг/т.

¹ Панферов В. И. О некоторых свойствах и об алгоритме косвенного контроля температурных полей массивных тел в период выдержки при постоянной температуре печи // Известия вузов. Черная металлургия. 1985. № 6. С. 114–116.

² Парсункин Б. Н., Панферов В. И. Контроль прогрета металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1981. № 10. С. 127–129.

В условиях дефицита реальных тяговых возможностей оборудования печей мероприятия по совершенствованию энергосберегающего управления газодинамическим режимом обеспечивают снижение удельного расхода условного топлива на 0,5–1,5 кг/т.

Для исключения нежелательного динамического взаимовлияния при одновременной работе двух основных подсистем необходимо регламентирование времени их функционирования.

При фиксированной длине всех отапливаемых зон печи в каждой из них одновременно нагревается разное количество заготовок, не совпадающих по своим параметрам и прокатываемых на полосы различных типоразмеров; управляющее воздействие на все заготовки одинаково. По этой причине при управлении тепловым режимом по $t_{\text{пов}}^3(\tau)$ заданным оптимальным значением температурного параметра в отапливаемой зоне является значение температуры самой «холодной» поверхности заготовки, наименее нагретой по расчетной температурной траектории. Одновременно предусмотрена возможность изменения управления в рабочей области: установление ограничения при выходе на режим $t_{\text{пов}}^{\text{max}}(\tau) = 1360^\circ\text{C}$ самой нагретой (горячей) из находящихся в зоне заготовок или ограничения по $t_{\text{пр}}^{\text{max}}(\tau) = (1380 - 1400)^\circ\text{C}$ для защиты огнеупорной кладки.

Выводы

В зависимости от текущей производительности прокатного стана и начального температурного состояния подаваемых на нагрев непрерывнолитых заготовок необходимо осуществлять оперативный переход экстремально-оптимизирующей концепции автоматического управления нагревом от стратегии максимальной производительности к стратегии минимальной себестоимости нагрева и наоборот.

Переход на управление режимом нагрева металла по температуре поверхности вместо общепринятой температуры рабочего пространства целесообразен. Это всегда дает значительное (от 3 до 6 кг/т) снижение потребления условного топлива за счет оперативного, объективного и целенаправленного контроля теплового режима.

Интеллектуальное поисковое экстремально-оптимизирующее энергосберегающее высокопроизводительное автоматическое управление нагревом металла в печах проходного типа рассчитано на программную реализацию, практически исключает субъективное вмешательство технологического персонала и не требует значительных затрат.

Список источников

Андреев С. М., Парсункин Б. Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. 376 с.

Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. Москва: Наука, 1969. 408 с.

Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. Москва: Наука, 1975. 568 с.

Гинсберг К. С., Генкин А. Л. К основам научной методологии структурной идентификации для цели создания реальных систем автоматического управления с требуемыми свойствами // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 3 (84). С. 24–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-3-84-3>.

Лукин С. В., Левашев К. Ю., Збродов А. А., Кибардин А. Н., Малыгин Л. Л. Системная и функциональная модели оценки теплового состояния стальной заготовки на технологической линии «МНЛЗ – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. № 5 (86). С. 8–16. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-5-86-1>.

Лукин С. В., Шестаков Н. И., Павлов М. В., Левашев К. Ю., Збродов А. А. Математическое моделирование и совершенствование тепловой обработки заготовок квадратного сечения на технологической линии «Сортовая МНЛЗ – Туннельный термос – Нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 1 (100). С. 41–55. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-3>.

Малый С. А. Автоматизация методических печей. – Москва: Металлургия, 1962. – 104 с.

Малый С. А. Некоторые оптимальные режимы нагрева металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1966. № 9. С. 175–179.

Панферов В. И. О некоторых свойствах и об алгоритме косвенного контроля температурных полей массивных тел в период выдержки при постоянной температуре печи // Известия вузов. Черная металлургия. 1985. № 6. С. 114–116.

Парсункин Б. Н., Андреев С. М. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывнолитой заготовки в методической печи с шагающими балками // Сталь. 2003. № 1. С. 71–74.

Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ахметов У. Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2006. 198 с.

Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Ишметьев Е. Н. Системы автоматической оптимизации управления технологическими процессами с запоминанием экстремума. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2015. 136 с.

Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Сухонослова (Обухова) Т. Г. Информационная система программно-инструментального контроля теплового состояния заготовок на выдаче из методической печи // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации: материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Магнитогорск, 25–26 октября 2005 г.) / под редакцией Д. Х. Девятова. Магнитогорск: Проф-Приг, 2005. С. 147–150.

Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Сухонослова (Обухова) Т. Г., Седельников С. В., Овчинников И. Ю. Опробование информационной системы контроля теплового состояния заготовок перед выдачей из методической печи // Сталь. 2006. № 12. С. 75–78.

Парсункин Б. Н., Панферов В. И. Контроль прогрева металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1981. № 10. С. 127–129.

Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. Москва: Наука, 1983. 393 с.

References

Andreev S. M., Parsunkin B. N. *Optimizatsiia rezhimov upravleniia nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa* [Optimizing the modes of controlling the heating of billets in through-type furnaces]. Magnitogorsk: MG TU im. G. I. Nosova, 2013. 376 p.

Boltianskii V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniia* [Mathematical methods of optimal control]. Moscow: Nauka, 1969. 408 p.

Butkovskii A. G. *Metody upravleniia sistemami s raspredelennymi parametrami* [Methods of managing systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka, 1975. 568 p.

Ginsberg K. S., Genkin A. L. K osnovam nauchnoi metodologii strukturnoi identifikatsii dlia tseli sozdaniia real'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniia s trebuemyimi svoistvami [On the structure identification scientific methodology foundations for the purpose of developing automatic control systems with required properties]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2018, no. 3 (84), pp. 24–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-3-84-3>.

Lukin S. V., Levashev K. Iu., Zbrodov A. A., Kibardin A. N., Malygin L. L. Sistemnaia i funktsional'naia modeli otsenki teplovogo sostoiianiia stal'noi zagotovki na tekhnologicheskoi linii “MNLZ – nagrevatel'naia pech” [Systemic and functional models for evaluation of heat state of steel billet on the technological line “continuous casting machine – heating stove”]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2018, no. 5 (86), pp. 8–16. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-5-86-1>.

Lukin S. V., Shestakov N. I., Pavlov M. V., Levashev K. Iu., Zbrodov A. A. Matematicheskoe modelirovanie i sovershenstvovanie teplovoi obrabotki zagotovok kvadratnogo secheniia na tekhnologicheskoi linii “Sortovaiia MNLZ – Tunnel'nyi termos – Nagrevatel'naia pech” [Mathematical modeling and optimization of heat processing of square cross section steel bar on the technological line “Continuous casting machine – Tunnel thermos – Heating furnace”]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2021, no. 1 (100), pp. 41–55. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-3>.

Malyi S. A. *Avtomatizatsiia metodicheskikh pechei* [Automation of continuous furnaces]. Moscow: Metallurgiiia, 1962. 104 p.

Malyi S. A. Nekotorye optimal'nye rezhimy nagreva metalla [Some optimal metal heating modes]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1966, no. 9, pp. 175–179.

Panferov V. I. O nekotorykh svoistvakh i ob algoritme kosvennogo kontroliia temperaturnykh polei massivnykh tel v period vyderzhki pri postoiannoii temperature pechi [On some properties and the algorithm for indirect control of the temperature thermal fields of massive bodies during the holding period at a constant furnace temperature]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgiiia* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1985, no. 6, pp. 114–116.

Parsunkin B. N., Andreev S. M. Prognozirovanie prodolzhitel'nosti nagreva nepreryvnoitoi zagotovki v metodicheskoi pechi s shagaiushchimi balkami [Predicting the heating time of continuous-cast billet in a stepping-beam continuous furnace]. *Stal'* [Steel], 2003, no. 1, pp. 71–74.

Parsunkin B. N., Andreev S. M., Akhmetov U. B. *Optimizatsiia upravleniia tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Optimization of production control in metallurgy]. Magnitogorsk: MG TU im. G. I. Nosova, 2006. 198 p.

Parsunkin B. N., Andreev S. M., Ishmet'ev E. N. *Sistemy avtomaticheskoi optimizatsii upravleniia tekhnologicheskimi protsessami s zapominaniem ekstremuma* [Systems for automatic optimization of production via extremum seeking control]. Magnitogorsk: MG TU im. G. I. Nosova, 2015. 136 p.

Parsunkin B. N., Andreev S. M., Sukhonosova (Obukhova) T. G. Informatsionnaia sistema programmno-instrumentalnogo kontroliia teplovogo sostoiianiia zagotovok na vydache iz metodicheskoi pechi [Information system of software-tool control of thermal condition of billets while removing from a continuous furnace]. *Sozdanie i vnedrenie korporativnykh informatsionnykh sistem (KIS) na promyshlennykh predpriatiakh Rossiiskoi Federatsii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Magnitogorsk, 25–26 oktiabria 2005 g.)* [Development and implementation of corporate information systems (CIS) at industrial enterprises of the Russian Federation: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference (Magnitogorsk, October 25–26, 2005); ed. by D. H. Devyatov]. Magnitogorsk: Prof-Prig, 2005, pp. 147–150.

Parsunkin B. N., Andreev S. M., Sukhonosova (Obukhova) T. G., Sedel'nikov S. V., Ovchinnikov I. Iu. Oprobovanie informatsionnoi sistemy kontrolya teplovogo sostoianiia zagotovok pered vudachei iz metodicheskoi pechi [Testing an information system for monitoring thermal states of blank parts before removing from a continuous furnace]. *Stal'* [Steel], 2006, no. 12, pp. 75–78.

Parsunkin B. N., Panferov V. I. Kontrol' progreva metalla [Control of metal heating]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1981, no. 10, pp. 127–129.

Pontriagin L. S. i dr. *Matematicheskaiia teoriia optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Nauka, 1983. 393 p.

Сведения об авторах

Борис Николаевич Парсункин – доктор технических наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>, promkim035@gmail.com, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия); **Boris N. Parsunkin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, <http://orcid.org/0000-0003-1822-2632>, promkim@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Сергей Михайлович Андреев – доктор технических наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>, andreev.asc@gmail.com, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия); **Sergey M. Andreev** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0003-0735-6723>, andreev.asc@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Елена Юрьевна Мухина – старший преподаватель кафедры автоматизированных систем управления, <https://orcid.org/0000-0003-2839-4200>, mukhinaeu@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 г. Магнитогорск, Россия); **Elena Yu. Mukhina** – Senior Lecturer of Automated Control Systems Department, <https://orcid.org/0000-0003-2839-4200>, mukhinaeu@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, Lenin pr., 455000 Magnitogorsk, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.04.2021; одобрена после рецензирования 10.08.2021; принята к публикации 18.08.2021.

The article was submitted 06.04.2021; Approved after reviewing 10.08.2021; Accepted for publication 18.08.2021.