

О.С. Волуева

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Одной из главных задач при получении непрерывно-литой стальной заготовки является обеспечение внутренней однородности слитка, которая во многом определяется процессами начальной кристаллизации. Несовершенство управления процессом разлива на начальном участке «стальковш-промковш-кристаллизатор», а именно уровнем металла в кристаллизаторе, приводит к возникновению не только внутренней неоднородности, но и дефектов поверхности, а также искажению формы заготовки. Так, падение уровня ниже заданного значения ведет к окислению внутренней поверхности образовавшейся корочки слитка и его структурной неоднородности. При повышении уровня металла происходит перелив за твердую корку, что приводит к увеличению глубины следов качания и захвату неметаллических и шлаковых включений. Поэтому важнейшим технологическим элементом машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является кристаллизатор. Научная и техническая сложность задачи управления уровнем обусловлена отсутствием технических средств, способных осуществлять измерение уровня металла в реальных технологических условиях с требуемой точностью, а также изменения параметров объекта в процессе эксплуатации и в нестационарных режимах работы. Одним из направлений повышения эффективности управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ является модернизация существующих систем управления за счет внедрения новых алгоритмов управления. Для этого необходимо выделить факторы, влияющие на стабильность уровня металла, с целью их оценки и компенсации. В работе предложено использовать принцип комбинированного управления на основе компенсации основных возмущений и обратной связи по регулируемой координате. Выполнен синтез статических компенсаторов с постоянным и переменным коэффициентом компенсации в соответствии с принципом инвариантности, что позволило значительно уменьшить отклонение управляемой величины в нестационарных режимах работы.

Непрерывная разливка стали; нестационарный режим литья; математическая модель; комбинированная система управления; регулятор; статический компенсатор.

O.S. Volueva

RESEARCH AND DESIGN OF THE COMBINED CCM MOLD LEVEL CONTROL SYSTEM

One of the main problems in the steel billets production using continuous casting is to provide the ingot internal uniformity, which is mainly determined by the initial solidification processes. The imperfection of the casting process control at the initial section "ladle-tundish-mold", especially the mold level, leads to occurrence of internal nonuniformity and surface defects, as well as distortion of the slab shape. Thus, the level drop below setting value leads to inner surface oxidation of the formed ingot crust and its structural nonuniformity. If metal level increases, overflow over the ingot crust occurs, which leads to increase the oscillation traces depth and capture of non-metallic and slag inclusions. Therefore, the mold is the most important technological element of the continuous casting machine (CCM). The scientific and technical complexity of the mold level control problem is the lack of technical capability of the metal level measuring in real technological conditions with the required accuracy, as well as changes in the object parameters during operation and in non-stationary modes. The modernization of existing control systems through the introduction of new control algorithms is one of the ways to improve the efficiency of the metal level stabilization control in the continuous casting machine mold. It demands to single out the factors affecting the metal level stability in order to observe and compensate them. In this paper implementation of the combined control principle based on the main disturbances compensation and controlled coordinate feedback is proposed. The synthesis of static compensators with con-

stant and variable compensation coefficients was carried out in accordance with the principle of invariance, which allows to significantly reduce the deviation of the controlled variable in non-stationary operating modes.

Continuous casting of steel; unsteady casting mode; mathematical model; combined control system; controller; static compensator.

Введение. Стабильность процесса непрерывной разливки определяется степенью выполнения технологических требований на участке дозирования стали из сталеразливочного ковша (стальковша) в кристаллизатор. Выявлено, что точность поддержания уровня металла в кристаллизаторе зависит от постоянства соотношения следующих параметров:

- 1) подача металла из промежуточного ковша (промковша);
- 2) скорость вытягивания.

Нестабильность подачи металла из промковша определяется отклонениями уровня металла в промковше в связи с неравномерным поступлением металла из стальковша; неравномерным расходом через дозирующее устройство в результате его так называемого «зараствания» различного рода отложениями.

Нестабильность, определяемая скоростью вытягивания, в основном связана с проскальзыванием слитка относительно роликов тянущей клетки, скачкообразными изменениями момента нагрузки двигателей при порезке непрерывно-литого слитка на мерные длины и т.д., но в наибольшей степени обусловлена специальными режимами работы:

- 1) режим пуска-останова;
- 2) режим замены сталеразливочного ковша («перековшовка»);
- 3) режимы замены технологических узлов: погружного стакана, промковша и

т.д. [1–3].

Таким образом, наиболее существенным возмущением, оказывающим влияние на изменение уровня металла в кристаллизаторе, является скорость вытягивания слитка тянущей клетью [4, 5]. При этом скорость изменяется в соответствии с технологическим регламентом, следовательно, влияние этого параметра на регулируемую величину может быть учтено. Этот факт позволяет перейти от используемой в большинстве существующих систем структуры управления по отклонению к комбинированной структуре [6, 7]. Комбинированное управление на основании компенсации измеряемого возмущения и обратной связи по регулируемой координате позволяет объединить быстроту реакции на возмущение и точность регулирования независимо от природы возмущений [8].

Целью работы является определение структуры и параметров компенсатора возмущений для комбинированной системы управления.

Синтез компенсаторов. В исследуемой системе реализуется компенсация по каналу «скорость вытягивания – уровень металла в кристаллизаторе» [9–10]. Обобщенная структурная схема модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ представлена на рис. 1. Задачи управления отдельно взятыми величинами решаются соответствующими локальными системами управления [11].

Синтез компенсирующих устройств основан на принципе инвариантности, который заключается в том, что отклонение выходной переменной от заданного значения должно быть равно нулю при любых задающих или возмущающих воздействиях. Для этого необходимо найти обратную модель системы по каналу «точка приложения сигнала от компенсатора – регулируемая переменная». И поскольку объект управления является астатическим, уже на этапе анализа становится очевидным, что реализация обратной динамики является задачей, не осуществимой на практике. В связи с этим, принято решение ограничиться частичной инвариантностью [12–14].

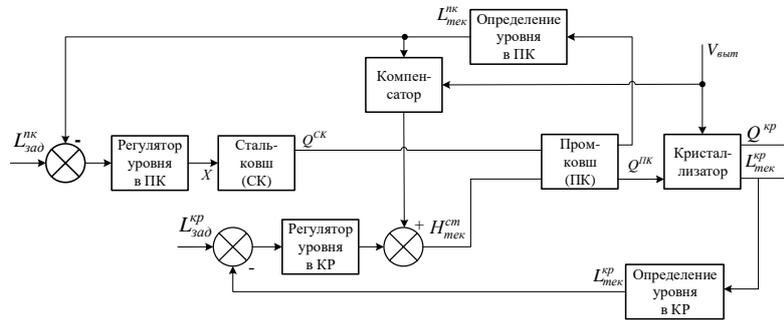


Рис. 1. Функциональная схема комбинированной системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе

Для нахождения структуры и параметров компенсатора используется структура, представленная на рис. 2 [15].

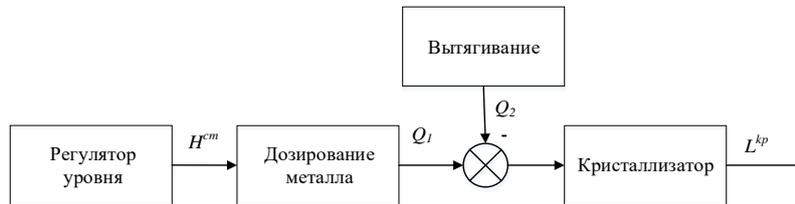


Рис. 2. Структурная схема для определения параметров компенсатора

Передаточная функция компенсатора в соответствии с принципом инвариантности находится по формуле:

$$W_k(s) = -\frac{W_{воз}(s)}{W_{упр}(s)}, \tag{1}$$

где $W_{воз}(s)$ – передаточная функция по каналу «скорость вытягивания – уровень металла»;

$W_{упр}(s)$ – передаточная функция по каналу «сигнал управления регулятора уровня – уровень металла».

Для нахождения статического компенсатора, необходимо найти отношение коэффициентов передачи этих передаточных функций.

$$K_k = -\frac{K_{воз}}{K_{упр}}. \tag{2}$$

Рассмотрим структурную схему рис. 3 для определения передаточной функции по управлению $W_{упр}(s)$.

$$W_{упр} = W_1(s) \cdot W_2(s), \text{ а } K_{упр} = K_1 \cdot K_2, \tag{3}$$

где $W_1(s) = \frac{Q_1(s)}{H^{cm}(s)} = \frac{K_{cm}}{s}$;

K_{cm} – коэффициент передачи стопорного затвора;

$$W_2(s) = \frac{L^{kp}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1/S_{kp}}{s}.$$

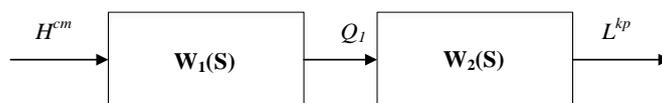


Рис. 3. Структурная схема для определения передаточной функции по управлению

Таким образом

$$K_1 = K_{cm}, K_2 = 1/S_{kp}, \text{ а } K_{yup}(s) = \frac{K_{cm}}{S_{kp}} \quad (4)$$

$$W_{воз}(s) = \frac{L^{kp}(s)}{V_{выт}(s)} = -\frac{1}{s}, K_{воз} = -1. \quad (5)$$

Тогда статический компенсатор будет иметь следующий вид:

$$K_{yup} = \frac{K_1 \cdot K_2}{S_{kp}}. \quad (6)$$

Коэффициенты K_1 и K_2 могут быть определены как коэффициенты наклона из линеаризованных зависимостей $S_C(H^{cm})$ и $Q_{ПК}(H^{cm}, L^{ПК})$ (рис. 4) [16].

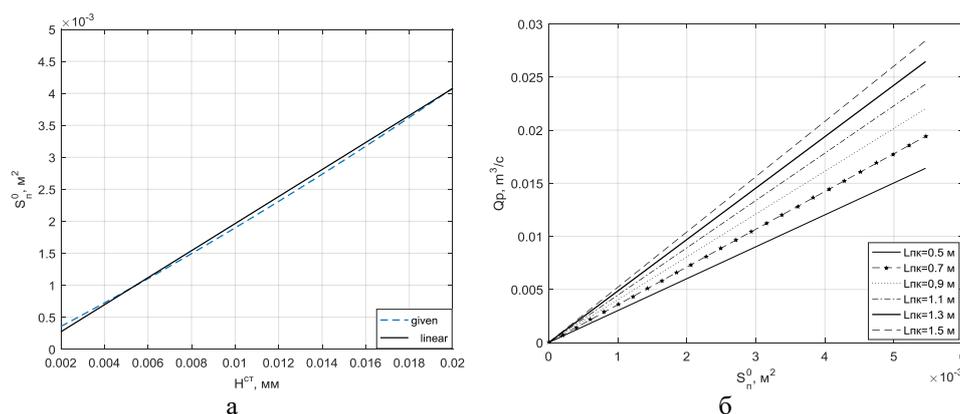


Рис. 4. Линеаризованные зависимости: а – $S_C(H^{cm})$; б – $Q_{ПК}(H^{cm}, L^{ПК})$

В общем случае коэффициент K_2 зависит от уровня металла в промковше (рис. 4,б):

$$K_{yup}(L^{ПК}) = \frac{K_1 \cdot K_2(L^{ПК})}{S_{kp}}, K_k(L^{ПК}) = -\frac{K_{воз}}{K_{yup}(L^{ПК})}. \quad (9)$$

Структурная схема подсистемы компенсации возмущения приведена на рис. 5. Входами подсистемы являются значение уровня металла в промковше, скорость вытягивания и порядковый номер типа компенсатора $N_{комн}$: 1 – $K_k=var$, 2 – $K_k=const$, 3 – $K_k=0$. Выходом является дополнительное перемещение, которое необходимо сообщить стопору ΔH^{cm} .

Структурная схема моделирования замкнутой комбинированной системы управления уровнем металла в кристаллизаторе с учетом подсистемы компенсации возмущения представлена на рис. 6 [17–18].

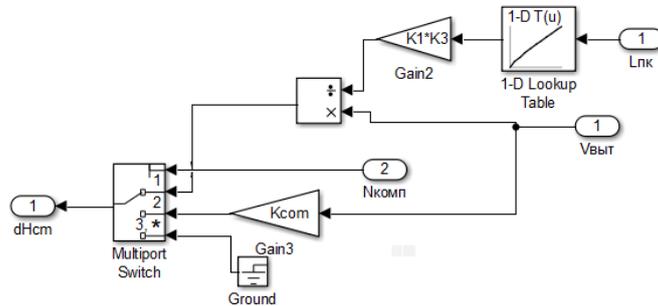


Рис. 5. Структурная схема моделирования подсистемы компенсации возмущения

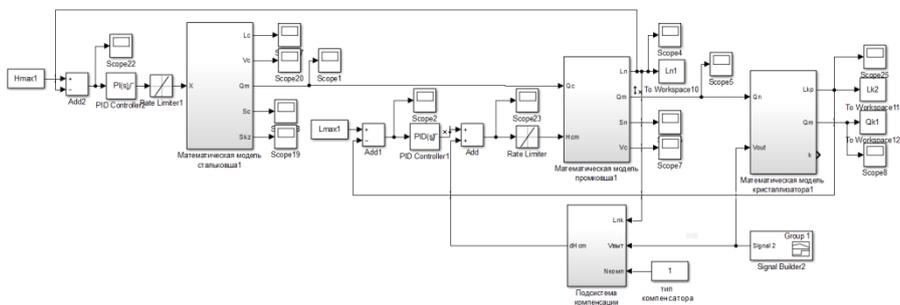


Рис. 6. Структурная схема моделирования комбинированной системы уровня металла в кристаллизаторе со статическими компенсаторами

В процессе разливки уровень металла в промковше зависит от баланса между количеством металла, поступающего из сталковша (постоянно убывающая величина, поскольку металл в сталковш не поступает), и истечением металла в кристаллизатор, которое зависит от изменений скорости вытягивания в соответствии с текущим режимом работы установки (например, пуск, останов, нормальный режим разливки, замена сталковша, замена погружного стакана, подготовка к замене промковша и т.д.). Исследования выполнены на примере непрерывной разливки двух сталковшей, при этом скорость вытягивания заготовки изменялась в соответствии с технологическим регламентом по графику, представленному на рис. 7.

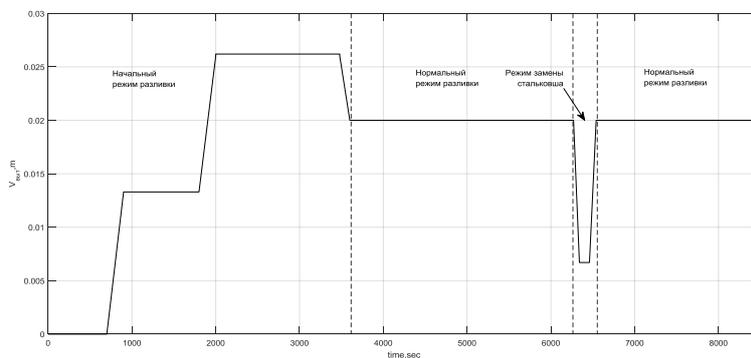


Рис. 6. Технологический регламент изменения скорости вытягивания заготовки (разливка двух сталковшей)

Методом математического моделирования определены допустимые границы значений статического коэффициента компенсации на основе анализа основных показателей качества переходных процессов. Наилучшие результаты для компенсатора с постоянным коэффициентом компенсации достигнуты при $K_k=0.27$.

Как было сказано ранее, коэффициент передачи K_2 зависит от значения уровня металла в проковше (9), поэтому целесообразным будет использование статического компенсатора с переменным коэффициентом компенсации, в котором данная зависимость в процессе разливки учитывается. Для задания закона изменения $K_2(L^{ПК})$ использованы возможности Matlab&Simulink для табличного задания коэффициента в точках с фиксированным шагом и линейной интерполяцией на интервалах между ними (рис. 7) [19–20].

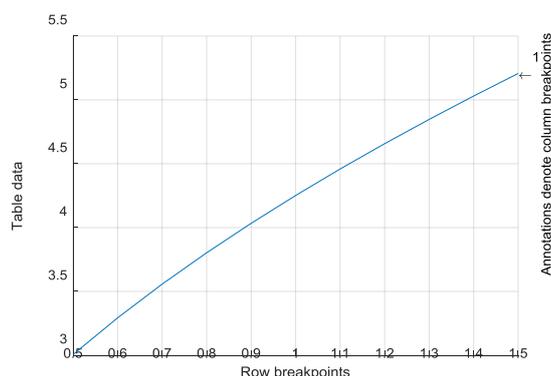


Рис. 7. Параметры блока Lookip-table для задания зависимости $K_2(L^{ПК})$

В режиме замены стальной заготовки («перековшовка») происходит не только снижение скорости вытягивания (см. рис. 6), но и происходит падение уровня металла в проковше до 30-40 см (рис. 8), что также учитывается при моделировании. Эти явления не могут быть полностью сбалансированными, поэтому не осуществляют взаимную компенсацию.

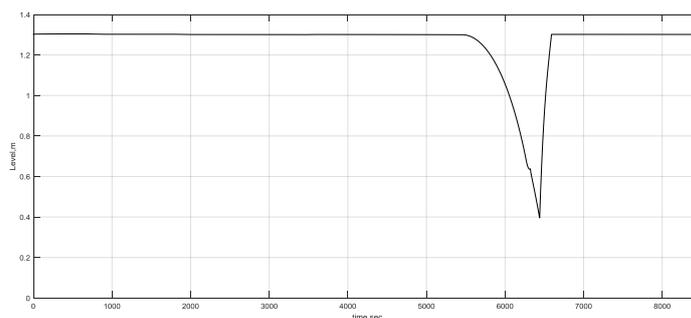


Рис. 8. График изменения уровня металла в проковше при последовательной разливке двух стальной заготовкой (с учетом режима замены стальной заготовки)

Таким образом, в системе одновременно присутствуют возмущения как по скорости вытягивания заготовки, так и по подаче металла в кристаллизатор. Результаты моделирования данного режима, представленные на рис. 9, показали высокую эффективность системы с переменным коэффициентом компенсации – отклонение уровня металла в кристаллизаторе не превысило допустимых пределов.

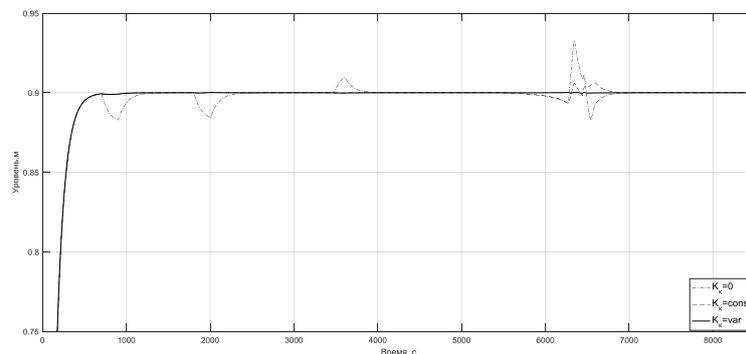


Рис. 9. Переходные процессы в системе при последовательной разливке двух стальнойшей

Таким образом, комбинированная система управления позволяет решить задачу управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в нестационарных режимах работы при изменении скорости вытягивания и уровня металла в проковше.

Выводы:

1. Исходя из анализа технологических особенностей процесса непрерывной разливки стали, принято решение использовать комбинированную структуру системы управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в нестационарных режимах работы, основанную компенсации измеряемого возмущения – скорости вытягивания.

2. Предложено два вида реализации цепи компенсации комбинированной системы управления:

1) с постоянным коэффициентом компенсации. Методом математического моделирования найдена область допустимых значений данного компенсатора, что позволяет достичь уменьшения степени отклонения уровня в 2 раза по сравнению с системой управления, построенной только по принципу обратной связи по отклонению;

2) с переменным коэффициентом компенсации, позволяющим снизить отклонение уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ до 5 раз по сравнению с результатами, достигнутыми в системе, построенной по принципу отклонения, в нестационарных режимах литья заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Кисленко В.В., Смирнов А.Н. Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. – М.: Теплотехник, 2009. – 528 с.
2. Куберский С.В. Непрерывная разливка стали: учеб. пособие. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 65 с.
3. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
4. Волуева О.С., Жукова Н.В., Корчак В.В. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 183. – С. 6-11.
5. Волуева О.С., Жукова Н.В., Ткаченко В.Н. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания МНЛЗ // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2011), 28-30 вересня 2011 року. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 204-205.

6. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления: пер. с англ. Б.И. Копылов. – М.: Лабораторий базовых знаний, 2004. – 832 с.
7. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // СТА. – 2006. – № 4. – С. 66-74. – URL: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (дата обращения 15.11.2020).
8. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
9. Гудвин, Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления: пер. с англ. А.М. Епанешникова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
10. Волуева О.С., Чернышев Н.Н. Модернизированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Луганськ, 2014). – Луганськ: Вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2014. – С. 122-124.
11. Волуева О.С. Комбинированная система управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – Вип. 34. – С. 186-192.
12. Волуева О.С. Модифицированная система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок: дисс. ... канд. тех. наук: 05.13.06. – Донецк, 2018. – 161 с. – URL: http://donntu.org/sites/default/files/documents/dissertaciya_volueva.pdf.
13. Дудников Е.Г. Автоматическое регулирование в химической промышленности. – М.: Химия, 1987. – 368 с.
14. Чернышев Н.Н. Синтез компенсаторов для комбинированных систем автоматического регулирования // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 32. – С. 52-56.
15. Подчукаев В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы): учеб. для вузов. – М.: Физматлит, 2005. – 392 с.
16. Jabri Karim, Bertrand Bele, Alain Mouchette, Emmanuel Godoy, Didier Dimur. Disturbances estimation for mold level control in the continuous casting process // Proceedings of the Fifth International Conference on informatics in control, automation and robotics, signal processing, systems modeling and control, Funchal, Madeira, Portugal, May 11-15, 2008. – P. 119-124. – URL: http://vigir.missouri.edu/~gdesouza/Research/Conference_CDs/IFAC_ICINCO_2008/ICINCO%202008/SPSMC/Short%20Papers/C3_196_Jabri.pdf (дата обращения 15.11.2020).
17. Волуева О.С., Чернышев Н.Н. Математическая модель изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор» установки непрерывной разливки стали // Сб. трудов конференции «Завалишинские чтения» 11-15 апреля 2016 г. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения 2016. – С. 278-283.
18. Чернышев Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Пухова, 2012. – Вип. 65. – С. 195-202.
19. Перельмутер В.М. Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 224 с.
20. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.N. Proizvodstvo stali. T. 4. Npreryvnaya razlivka metalla [Production of steel. Vol. 4. Continuous casting of meta]. Moscow: Teplotekhnik, 2009, 528 p.
2. Kuberskiy S.V. Npreryvnaya razlivka stali: ucheb. Posobie [Continuous casting of steel: a textbook]. Alchevsk: DGMI, 2004, 65 p.

3. Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Shtepan E.V. Nepreryvnaya razlivka stali [Continuous casting of steel]. Donetsk: DonNTU, 2011, 482 p.
4. Volueva O.S., Zhukova N.V., Korchak V.V. Sistema avtomaticheskogo upravleniya urovnem metalla i skorosti vytyagivaniya zagotovki iz kristallizatora [The system of automatic control of the metal level and the speed of pulling out a billet from a Crystallizer], *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: "Obchislyval'na tekhnika ta avtomatizatsiya"* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: "Computer Engineering and automation"]. Donetsk: DonNTU, 2011, Issue 183. pp. 6-11.
5. Volueva O.S., Zhukova N.V., Tkachenko V.N. Sistema avtomaticheskogo upravleniya urovnem metalla i skorosti vytyagivaniya MNLZ [Automatic control of the metal level and the pulling speed of the CCM], *Materiali XVIII mizhnarodnoi konferentsii z avtomatichnogo upravlinnya (Avtomatika-2011), 28-30 veresnya 2011 roku* [Proceedings of the XVIII international conference on automatic control (Automatika-2011), September 28-30, 2011]. L'viv: Vidavnistvo L'vivs'koi politekhniky, 2011, pp. 204-205.
6. Dorf R., Bishop R. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern control systems]: transl. from engl. B.I. Kopylov. Moscow: Laboratoriy bazovyykh znaniy, 2004, 832 p.
7. Denisenko V.V. PID-regulyatory: printsipy postroeniya i modifikatsii [PID-regulators: principles of construction and modification], *STA* [Modern automation technologies], 2006, No. 4, pp. 66-74. Available at: <https://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf> (accessed 15 November 2020).
8. Zaytsev G.F. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya* [Theory of automatic control and regulation]. 2nd ed. Kiev: Vyshcha shk. Golovnoe izd-vo, 1989, 431 p.
9. Gudvin, G.K., Grebe S.F., Sal'gado M.E. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Designing control systems]: transl. from engl. A.M. Epaneshnikova. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004, 911 p.
10. Volueva O.S., Chernyshev N.N. Modernizirovannaya sistema avtomaticheskogo regulirovaniya urovnem metalla v kristallizatore MNLZ [Upgraded system for automatic control of the metal level in the CCM mold], *Suchasni tendentsii rozvitku informatsiyних tekhnologiy v nausti, osviti ta ekonomitsi: materialy VIII Vseukr. nauk.-prakt. konf. (m. Lugans'k, 2014)* [Modern trends in the development of information technologies in science, education and economics: materials of the VII all-Ukrainian science and practice. conf. (Luhansk, 2014)]. Lugans'k: Vidvo DZ,, LNU imeni Tarasa Shevchenka", 2014, pp. 122-124.
11. Volueva O.S. Kombinirovannaya sistema upravleniya urovnem metalla v kristallizatore MNLZ [Combined control system of metal level in the continuous casting mold], *Zbirnik naukovikh prats' Donets'kogo institutu zaliznichnogo transportu Ukrain's'koi derzhavnoi akademii zaliznichnogo transport* [Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of railway transport of the Ukrainian state Academy of railway transport]. Donetsk: DonIZT, 2013, Issue 34, pp. 186-192.
12. Volueva O.S. Modifitsirovannaya sistema avtomaticheskogo upravleniya stabilizatsiey urovnnya metalla v nestatsionarnykh rezhimakh lit'ya zagotovok: disc. ... kand. tekhn. nauk [Modified system of automatic control of metal level stabilization in non-stationary modes of billet casting: cand. of eng. sc, diss.] 05.13.06. Donetsk, 2018, 161 p. Available at: http://donntu.org/sites/default/files/documents/dissertaciya_volueva.pdf.
13. Dudnikov E.G. *Avtomaticheskoe regulirovanie v khimicheskoy promyshlennosti* [Automatic regulation in the chemical industry]. Moscow: Khimiya, 1987, 368 p.
14. Chernyshev N.N. Sintez kompensatorov dlya kombinirovannykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Synthesis of compensators for combined automatic control systems], *Zbirnik naukovikh prats' Donets'kogo institutu zaliznichnogo transportu Ukrain's'koi derzhavnoi akademii zaliznichnogo transport* [Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of railway transport of the Ukrainian state Academy of railway transport]. Donetsk: DonIZT, 2012, Issue 32, pp. 52-56.
15. Podchukaev V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (analiticheskie metody): ucheb. dlya vuzov* [Theory of automatic control (analytical methods): textbook for universities]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 392 p.
16. Jabri Karim, Bertrand Bele, Alain Mouchette, Emmanuel Godoy, Didier Dimur. Disturbances estimation for mold level control in the continuous casting process, *Proceedings of the Fifth International Conference on informatics in control, automation and robotics, signal processing, systems modeling and control, Funchal, Madeira, Portugal, May 11-15, 2008*,

- pp. 119-124. Available at: http://vigir.missouri.edu/~gdesouza/Research/Conference_CDs/IFAC_ICINCO_2008/ICINCO%202008/SPSMC/Short%20Papers/C3_196_Jabri.pdf (accessed 15 November 2020).
17. *Volueva O.S., Chernyshev N.N.* Matematicheskaya model' izmeneniya urovnya zhidkogo metalla na uchastke «stal'kovsh-kristallizator» ustanovki nepreryvnoy razlivki stali [Mathematical model of changes in the level of liquid metal in the area, "the ladle with steel-mold" installation of continuous casting of steel], *Sb. trudov konferentsii «Zavalishinskie chteniya» 11-15 aprelya 2016 g.* [Proceedings of the conference "Zavalishina read" April 11-15, 2016]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2016, pp. 278-283.
 18. *Chernyshev N.N.* Sintez matematicheskoy modeli sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya urovnem metalla v kristallizatore [Synthesis of a mathematical model of the system of automatic control of the metal level in the mold], *Zbirnik naukovikh prats' «Modelyuvannya ta informatsiyi tekhnologii»* [Collection of scientific papers "Modeling and information technologies"]. Kiiv: Institut problem modelyuvannya v energetitsi im. G.E. Pukhova, 2012, Issue 65, pp. 195-202.
 19. *Perel'muter V.M.* Pakety rasshireniya MATLAB. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox [MATLAB extension packages. Control System Toolbox and Robust Control Toolbox]. Moscow: SOLON-PRESS, 2008, 224 p.
 20. *D'yakov V.P.* MATLAB. Polnyy samouchitel' [MATLAB. Complete tutorial]. Moscow: DMK Press, 2012, 768 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Данилов.

Волуева Ольга Сергеевна – Донецкий национальный технический университет; e-mail: voluevaos_work@mail.ru; 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58; тел.: +380623010369; доцент.

Volueva Olga Sergeyevna – Donetsk National Technical University; e-mail: voluevaos_work@mail.ru; 58, Artema street, Donetsk, 283001; phone: +380623010369; associate professor.

УДК 534.7, 534-8

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-213-221

А.Ю. Малыхин, А.В. Скрылёв, А.А. Панич

ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЙ ФОКУСИРУЮЩИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Настоящее исследование выполнено на стыке двух направлений: инженерно-технологического и биомедицинского, в результате которого разработан терапевтический фокусирующий ультразвуковой преобразователь, предназначенный для выявления и неинвазивного лечения новообразований. Принцип действия заключается в излучении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в пятно фокуса (High Intensity Focused Ultrasound – HIFU). Это позволяет точно воздействовать на выбранные области и проводить абляцию воспалённых, либо чужеродных тканей без открытого хирургического вмешательства. На основе характеристик пьезокерамических материалов, выпускаемых в НКТБ «Пьезоприбор» выполнено математическое моделирование HIFU-преобразователя. Основу составляет пьезокерамический элемент, выполненный в форме тонкостенного сегмента сферы с центральным отверстием, изготовленный из пьезоматериала ПКП-35. Центральное отверстие диаметром 41,4 мм предназначено для датчика визуализации, выполняющего роль «наводчика» сфокусированного ультразвукового пучка. Принцип работы преобразователя заключается в следующем: фокусное пятно с максимальным акустическим давлением находится в области, захватываемой УЗИ-совместимым датчиком. Изображение передаётся на монитор, после чего принимается решение на какие области и с какой интенсивностью воздействовать ультразвуковым преобразователем. Изучены амплитудно-частотные характеристики преобразователя. Получены зависимости активной проводимости от частоты в свободном и нагруженном на воду состояниях. Измерены