

## ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

Диденко В. А., Бондаренко А. Ф., Полено А. Н.

Важным функциональным элементом машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является кристаллизатор. Немаловажное значение имеет точность поддержания заданной траектории движения кристаллизатора, что в значительной степени определяется точностью формирования эталонного сигнала. Поэтому актуальной является разработка метода формирования эталонного сигнала, обеспечивающего необходимую точность. Использование спектрального анализа и введение величины среднеквадратичного значения ошибки задания сигнала, сравнение ее с технологическим допуском позволило разработать предлагаемый метод. Показано, что разработанный метод формирования эталонного сигнала перемещения кристаллизатора МНЛЗ обеспечивает высокую точность воспроизведения траектории перемещения и плавное изменение ускорения движения. Также ввиду его простоты и более высокой точности в сравнении с прототипом он может быть использован как при задании закона движения в системе управления механизмом качания кристаллизатора МНЛЗ, так и при моделировании подобных систем.

Важливим функціональним елементом машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є кристалізатор. Чимале значення має точність підтримки заданої траєкторії руху кристалізатора, що в значній мірі визначається точністю формування еталонного сигналу. Тому актуальною є розробка методу формування еталонного сигналу, що забезпечує необхідну точність. Використання спектрального аналізу та введення величини середньоквадратичного значення похибки завдання сигналу, порівняння її з технологічним допуском дозволило розробити запропонований метод. Показано, що розроблений метод формування еталонного сигналу переміщення кристалізатора МБЛЗ забезпечує високу точність відтворення траєкторії переміщення і плавну зміну прискорення руху. Також зважаючи на його простоту і більш високої точності в порівнянні з прототипом він може бути використаний як при завданні закону руху в системі керування механізмом хитання кристалізатора МБЛЗ, так і при моделюванні подібних систем.

Mold is a main functional element of continuous casting machine (CCM). The accuracy of maintaining given trajectory of mold movement, which is largely determined by the accuracy of forming reference signal, is very important. Therefore, the development of a method of forming reference signal which provides the necessary accuracy is a relevant task. Use of spectral analysis and root-mean-square error of signal generation, error comparison with the manufacturing tolerance made it possible to develop proposed method. It is shown that the method of forming reference signal of CCM mold movement provides high accuracy of movement path reproduction and smooth change of motion acceleration. As of its simplicity and higher accuracy comparing to prototype, it can be used as a law of motion generation in the control system of CCM mold oscillation mechanism, and for modeling such systems.

Диденко В. А.

аспирант НТУУ «КПИ»  
[didenko.viktor@gmail.com](mailto:didenko.viktor@gmail.com)

Бондаренко А. Ф.

канд. техн. наук, доц., докторант НТУУ «КПИ»  
[bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)

Полено А. Н.

аспирант ДонГТУ

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев;

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Лисичанск.

УДК 681.532.1

Диденко В. А., Бондаренко А. Ф., Полено А. Н.

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ КАЧАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ**

Важным функциональным элементом машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является кристаллизатор [1]. Его работа в значительной степени определяет качество непрерывно литой заготовки. Кристаллизатор принимает жидкий металл из промежуточного ковша и переводит поверхностный слой жидкой стали в твердое состояние посредством отвода тепла охлаждающей водой. Внутренняя форма кристаллизатора определяет форму металлической заготовки [1, 2].

Современные МНЛЗ оснащены гидравлической системой привода механизма качания кристаллизатора. Ее внедрение стало возможным благодаря развитию методов автоматизации [3], что дало возможность реализовать как традиционные синусоидальные режимы качания, так и несинусоидальные [4]. Известно, что использование последних благоприятно влияет на качество поверхности непрерывно литой заготовки, т. к. при этом уменьшается глубина следов качания [5].

Анализ литературных источников показал, что существует проблема при формировании закона вертикального перемещения кристаллизатора МНЛЗ. Она заключается в отсутствии критериев, которым должен он удовлетворять. Однако в работе [6] не уделяется внимания такой проблеме, как точность формирования эталонного сигнала. При этом в работе [7] отмечено, что точность поддержания заданной траектории движения кристаллизатора, которая в значительной степени определяется точностью формирования эталонного сигнала, имеет немаловажное значение. На наш взгляд, рациональнее объединить эти два важных момента при формировании эталонного сигнала вертикального перемещения кристаллизатора.

Целью данной работы является разработка метода формирования эталонного сигнала вертикального перемещения кристаллизатора МНЛЗ обеспечивающего необходимую точность формирования закона перемещения и позволяющего уменьшить ударные нагрузки на механизм качания.

Законы качания кристаллизаторов МНЛЗ принято разделять на две группы [1]: синусоидальные (также называемые гармоническими или симметричными) и несинусоидальные (также называемые ассиметричными). Данные законы на интервале периода колебаний можно описать выражениями (1) и (2) соответственно:

$$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

$$x(t) = \begin{cases} X_m \cdot \sin\left(\frac{\omega}{2 \cdot k} \cdot t\right), & t \in [0; t_1]; \\ X_m \cdot \cos\left(\frac{\omega \cdot t - \pi \cdot k}{2 - 2 \cdot k}\right), & t \in [t_1; t_2]; \\ -X_m \cdot \cos\left(\frac{\omega \cdot t - 2 \cdot \pi + \pi \cdot k}{2 \cdot k}\right), & t \in [t_2; T], \end{cases} \quad (2)$$

где  $X_m$  – амплитуда перемещения;  $k$  – коэффициент несинусоидальности;

$T = \frac{1}{f}$  – период колебаний;  $f$  – частота колебаний;  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – круговая частота колебаний;

$t_1 = \frac{k \cdot T}{2}$ ,  $t_2 = T - t_1$  – границы временного интервала (период).

Согласно выражениям (1) и (2) построены зависимости вертикального перемещения кристаллизатора от времени, которые показаны на рис. 1. При этом амплитуда перемещения составляет 3 мм, частота качаний – 2 Гц, коэффициент несинусоидальности – 0,7 [8].

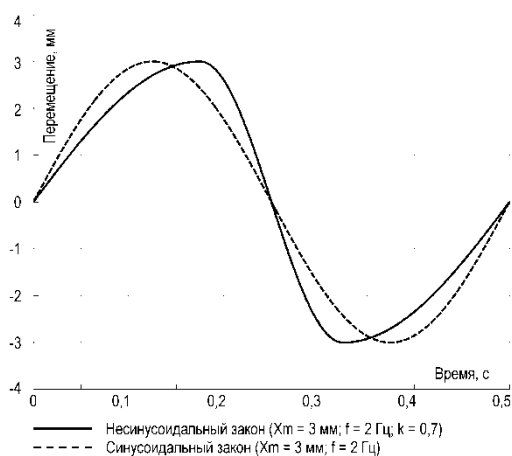


Рис. 1. Типовые законы качания кристаллизатора

Несинусоидальный закон качания по сравнению с гармоническим имеет меньшее время опережения, что способствует формированию более прочного поверхностного слоя заготовки и, соответственно, снижению вероятности его прорыва [2]. Дифференцированием выражений (1) и (2) по времени получаем графики изменения скорости движения кристаллизатора. Они представлены на рис. 2 вместе с постоянной скоростью разливки, которая рассчитана для индекса опережения 1,4 при синусоидальном режиме качания [6].

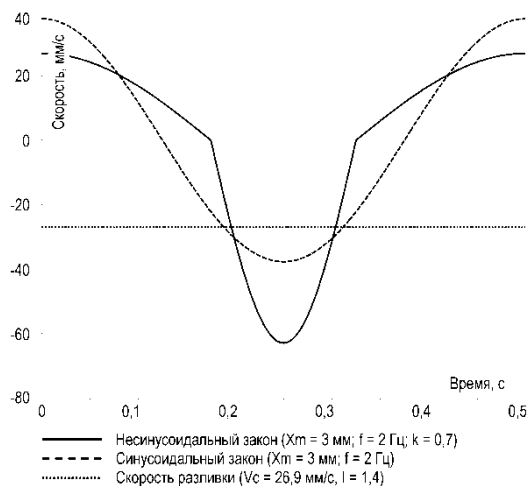


Рис. 2. Скорости движения кристаллизатора и скорость разливки

Двойным дифференцированием выражений (1) и (2) по времени получаем ускорения движения кристаллизатора, графики которых показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, на графике, соответствующем несинусоидальному режиму работы, присутствуют резкие скачки ускорения при смене направления движения.

С целью исключения ударных нагрузок и снижения вероятности образования волновых колебаний металла в кристаллизаторе, обусловленных скачками ускорения движения кристаллизатора при несинусоидальном режиме качания, в работе [6] предлагается усовершенствованный режим качания. Усовершенствование заключается в сглаживании скачков ускорения движения кристаллизатора прямыми (линейная интерполяция). Результат применения данного подхода показан на рис. 4, где приводятся исходная и сглаженная кривые ускорения движения.

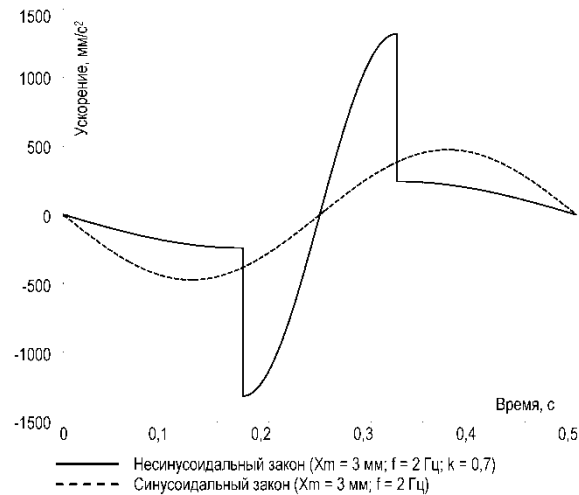


Рис. 3. Ускорения движения кристаллизатора

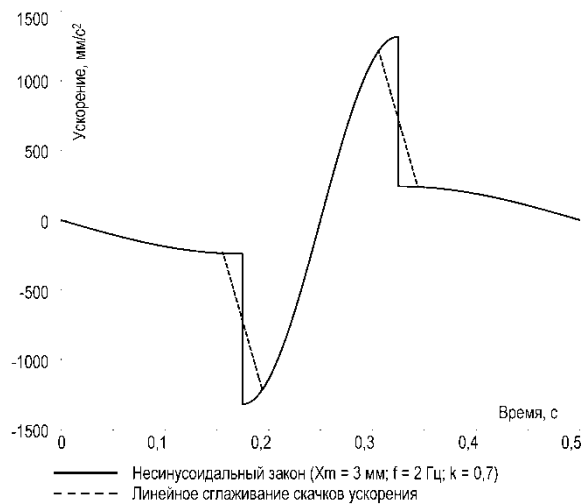


Рис. 4. Линейное сглаживание скачков ускорения несинусоидального закона

Закон перемещения кристаллизатора получается двойным интегрированием сглаженной кривой ускорения с учетом начальных условий. Кривая перемещения, полученная в результате интегрирования, а также кривая, построенная в соответствии с выражением (2), показаны на рис. 5. Из рисунка видно, что отличие этих кривых незначительно.

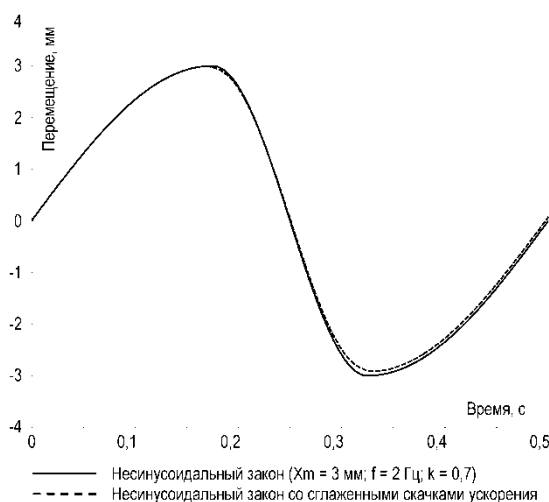


Рис. 5. Закон перемещения кристаллизатора при сглаженных скачках ускорения

В работе [6] при сравнении закона качания, полученного двойным интегрированием сглаженной кривой ускорения, с кривой, построенной согласно выражению (2) приводится следующее утверждение: «... представляется целесообразным усовершенствовать несинусоидальный режим качания с целью частичного или полного исключения второй гармоники из спектра перемещения кристаллизатора. То есть необходимо исключить резкий скачок в сигнале ускорения при смене направления движения кристаллизатора». Данное утверждение является некорректным без проведения спектрального анализа.

С помощью функции быстрого преобразования Фурье в среде MATLAB был проведен спектральный анализ кривой, заданной выражением (2), и кривой перемещения, полученной в результате линейного сглаживания скачков ускорения движения. Результат анализа показан на рис. 6, где FFTx – спектр кривой перемещения, заданной выражением (2); FFTdi – спектр кривой перемещения, полученной в результате линейного сглаживания скачков ускорения движения. Сравнение спектрального состава этих кривых показывает, что ожидаемого в работе [6] уменьшения второй гармоники не произошло. Наоборот, вторая гармоника увеличилась, как и амплитуды высших гармоник, при этом амплитуда основной гармоники снизилась.

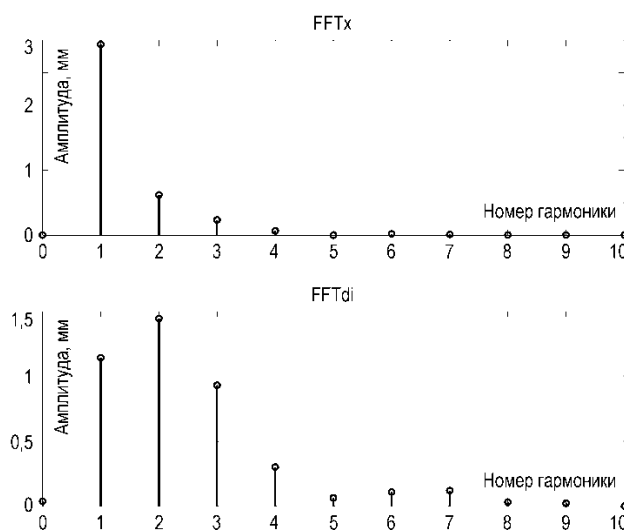


Рис. 6. Амплитудные спектры законов перемещения кристаллизатора

Разложение выражения (2) в ряд Фурье с числом гармоник  $N$  имеет вид:

$$x_h(t) = \sum_{n=0}^N X_n \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n), \quad (3)$$

где  $n$  – номер гармоники;  $X_n$  и  $\varphi_n$  соответственно амплитуда и начальная фаза гармоники (табл. 1).

Таблица 1

Параметры гармонических составляющих уравнения (3)

$n$	$X_n$ , мм	$\varphi_n$ , рад
0	0	1,57
1	2,9308	-0,0063
2	0,6209	3,1289
3	0,2367	-0,0185
4	0,0665	3,1152

Для каждой из составляющих была определена ее доля в основном сигнале с помощью выражения:

$$P_n = \frac{X_n}{X_m} \cdot 100. \quad (4)$$

Они составляют в порядке возрастания номеров гармоник в таблице 1: 97,7 %, 20,7 %, 7,9 %, 2,2 % соответственно.

Согласно требованиям технологии, отклонение фактического закона перемещения от заданного должно составлять не более  $\pm 0,1$  мм [7]. Подставляя этот параметр в числитель выражения (4), определяем опорное значение, которое составляет 3,3 %.

Из сравнения долей составляющих амплитудного спектра основного сигнала, заданного выражением (2), с опорным значением видно, что значащими являются первые четыре гармоники ( $P_4 < 3,3$  %), которые можно использовать для формирования эталонного сигнала перемещения. Это подтверждается верхней диаграммой на рис. 6.

Было проведено сравнение отклонений графиков сигналов перемещения (ошибок), полученных при использовании метода, описанного в [6], и при использовании выражения (3), от графика, полученного в соответствии с (2). Графическая интерпретация ошибок формирования сигнала перемещения на временном интервале периода основной частоты колебаний показана на рис. 7. Сплошная кривая характеризует ошибку модифицированного метода, предложенного в [6], пунктирная – методики с использованием выражения (3). Ее амплитуда в сравнении с первой не превышает 0,04 мм, что качественно показывает на увеличение точности формирования сигнала перемещения. Кроме того, варьированием количества гармоник можно изменять точность задания эталонного сигнала. В связи с этим требует решения задача определения необходимого количества гармоник для обеспечения желаемой точности задания.

Для оценки точности формирования эталонного сигнала перемещения с использованием различных методов найдем среднеквадратические значения ошибок (СКЗ) на интервале периода колебаний:

$$\varepsilon_{harm} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (x(t) - x_h(t))^2 dt}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{harm}$  – среднеквадратическое значение ошибки задания сигнала с помощью выражения (5).

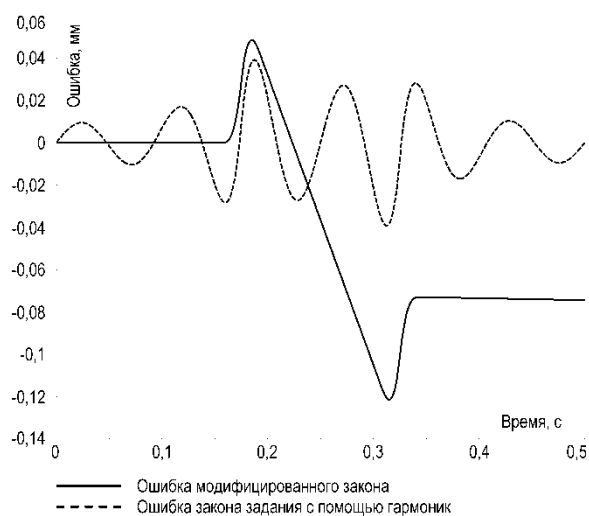


Рис. 7. Ошибки формирования сигнала перемещения

Для оценки среднеквадратического значения ошибки задания сигнала при использовании метода, описанного в [6], в выражении (5) вместо  $x_h(t)$  использован массив данных закона качания, обозначенного пунктиром на рис. 5. Данное значение составило 0,057 мм.

Для выражения (3) в зависимости от количества гармоник в пределах от 1 до 10 произведена оценка точности согласно выражению (5). Результаты показаны на рис. 8. Также на рис. 8 для сравнения приведено значение СКЗ для метода, описанного в [6] (0,057 мм), и величина технологического допуска (0,1 мм). Для четырех гармоник выражения (3) величина СКЗ ошибки по перемещению составляет 0,023 мм.

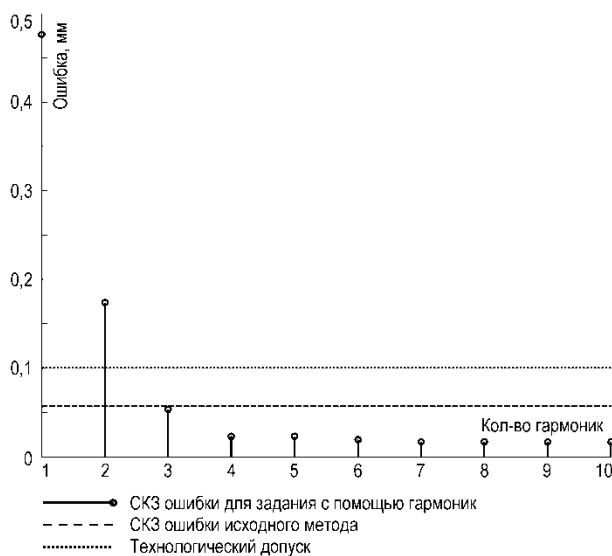


Рис. 8. Среднеквадратические значения ошибок задания сигнала

Сравнение полученных СКЗ показывает, что точность формирования эталонного сигнала согласно (3) с использованием первых четырех гармоник на 60 % выше, чем точность, получаемая с помощью метода, описанного в [6]. Также следует отметить, что формирование закона качания кристаллизатора как с помощью линейного сглаживания скачков ускорения, так и с помощью гармонических составляющих не противоречит технологическим требованиям, поскольку СКЗ ошибок задания не достигают технологического допуска (пунктирная линия на рис. 8) с большим запасом.

Применение двух гармоник для задания выражения (3) не позволяет выполнить технологические требования. При использовании трех гармоник оба метода практически идентичны по точности. При использовании четырех гармоник достигается существенное повышение точности по сравнению с методом, описанным в [6]. Дальнейшее увеличение количества гармоник практически не влияет на СКЗ.

Двойное дифференцирование по времени выражения (3) позволяет определить ускорение движения кристаллизатора. Кривая этого ускорения показана пунктиром на рис. 9, где для сравнения также приведены кривые, ранее показанные на рис. 4. Как следует из рисунка, предлагаемый метод задания закона качания кристаллизатора полностью удовлетворяет требованиям, поставленным к его ускорению в [6]. К тому же имеет место плавное изменение ускорения на всем интервале периода.

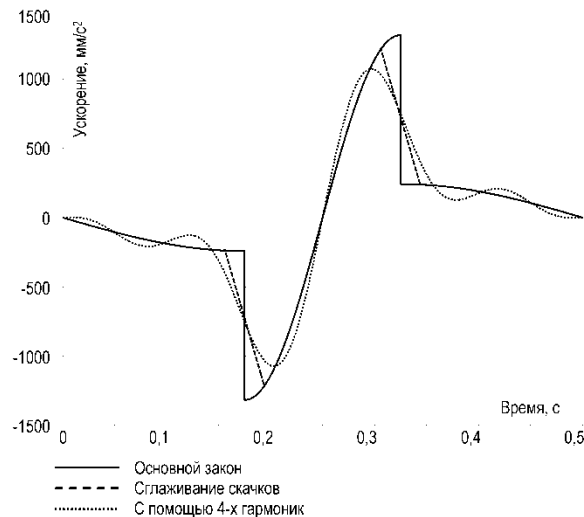


Рис. 9. Ускорения движения кристаллизатора при различных методах задания законов перемещения

## ВЫВОДЫ

В работе показано, что разработанный метод формирования эталонного сигнала перемещения кристаллизатора МНЛЗ обеспечивает высокую точность воспроизведения траектории перемещения и плавное изменение ускорения движения, что позволяет уменьшить ударные нагрузки на механизм качания. С помощью полученной зависимости СКЗ ошибки формирования эталонного сигнала от количества гармоник установлено количество гармоник, необходимое для достижения желаемой точности формирования сигнала с учетом технологических требований. Предложенный метод формирования сигнала, ввиду его простоты и более высокой точности в сравнении с прототипом из [6], может быть использован как при задании закона движения в системе управления механизмом качания кристаллизатора МНЛЗ, так и при моделировании подобных систем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Системы диагностики процесса качания кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А. Ю. Цупрун, Д. А. Кубкин, О. В. Антыкуз, А. В. Колоколов, В. М. Пильгаев // 50 лет непрерывной разливки стали в Украине. – 2010. – С. 247–253. – Режим доступа : <http://ea.donntu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/7369/1/Системы%20диагностики%20процесса%20качания.pdf>.
3. Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А. Ю. Цупрун, А. Г. Редько, А. В. Колоколов, Д. А. Онух, В. М. Пильгаев // Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков. – Режим доступа : <http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>.
4. Особенности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом [Текст] / А. Н. Смирнов, О. В. Антыкуз, А. Ю. Цупрун, В. М. Пильгаев [и др.] // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 290–294.
5. Some Approaches to Choosing Rational Mold Oscillation Parameters / A. N. Smirnov, O. V. Antyukuz, A. Yu. Tsuprun, V. M. Pilgaev // Russian Metallurgy (Metally). – 2008. – No. 8. – P. 700–705.
6. Антыкуз О. В. Усовершенствование несинусоидального режима качания кристаллизатора слябовой МНЛЗ [Текст] / О. В. Антыкуз // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2013. – № 40. – С. 116–122.
7. Усовершенствование технологии и оборудования машин непрерывного литья заготовок / М. Бровман, И. Марченко, Ю. Кан, В. Иванов. – К. : Техника, 1976. – 165 с.
8. Бондаренко О. Ф. Математична модель обробки даних в системі моніторингу параметрів хитання кристалізатора машини безперервного лиття заготовок [Текст] / О. Ф. Бондаренко, О. М. Полєно, В. О. Дієнко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – № 18. – С. 70–76.