

УДК 620.179.147

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В СОРТОВЫХ КРИСТАЛЛИЗАТОРАХ

*И. В. ТЕРЕХИН, Е. А. СЛАВИНСКАЯ*

Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия

UDC 620.179.147

## PULSED EDDY CURRENT MOLTEN METAL LEVEL SENSOR FOR BILLET CASTER

*I. V. TEREKHIN, E. A. SLAVINSKAYA*

**Аннотация.** Представлен импульсный вихретоковый датчик для определения уровня жидкого металла в сортовых кристаллизаторах в процессе непрерывной разливки. Описаны технологические условия проведения электромагнитного контроля уровня в кристаллизаторах, приведены основные проблемы при гармоническом возбуждении и пути их решения при импульсном возбуждении преобразователя. В промышленных условиях подтверждена работоспособность предложенных решений. За счет свойств импульсного возбуждения удается устранить дрейфы, а также влияние стальной рубашки кристаллизатора на измерения уровня металла.

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, импульсное возбуждение, непрерывная разливка стали, контроль уровня металла.

**Abstract.** The article deals with the pulsed eddy current sensor for determining molten steel level in a mold in the continuous casting process. The technological conditions for electromagnetic testing of steel level in a mold are described. The main problems of conventional excitation method and possible solutions by using pulsed excitation are given. The proposed solutions efficiency has been confirmed in industrial conditions. The study reports that pulsed excitation allows to eliminate drifts and influence of steel mold jacket on the level measurement quality.

**Keywords:** eddy current testing, pulsed excitation, continuous steel casting, metal level control.

**Введение.** Технология непрерывной разливки стали повсеместно используется на металлургических предприятиях в России. Одним из ключевых элементов машины непрерывного литья заготовок является кристаллизатор. Его рабочая часть в виде медной сквозной гильзы предназначена для приема жидкого металла и формирования заготовки заданного сечения (рис. 1).

Для обеспечения высокого качества заготовки требуется контролировать и поддерживать стабильный уровень металла в гильзе кристаллизатора. Информацию о текущем положении уровня регистрируют с помощью, в частности, электромагнитных датчиков. Электромагнитные датчики уровня регистрируют изменение поля вихревых токов, наводимых в объекте контроля при появлении металла. Первичное электромагнитное поле датчика обычно создается с помощью синусоидального или импульсного возбуждения.

При вихретоковом контроле уровня в кристаллизаторах малого сечения, как правило, используют тепловой способ определения уровня металла. При заполнении металлом гильза нагревается неравномерно. Выше мениска ее температура заметно ниже по сравнению с нижней частью. Распределение температуры следует за положением мениска. Поэтому, контролируя его, можно определять уровень, измеряя электропроводность гильзы в нескольких точках по высоте гильзы с помощью вихретокового преобразователя.

К основным требованиям к датчику относится стабильность показаний в условиях длительной непрерывной работы (до недели), часто под влиянием мощного переменного электромагнитного поля устройства для перемешивания стали (ЭМП). На стабильность показаний влияет ряд факторов [1]. Во-первых, объект контроля является многослойным, при этом магнитная проницаемость стальной рубашки кристаллизатора, находящейся между преобразователем и гильзой, циклически изменяется под влиянием поля ЭМП. На рис. 2 показано, как при этом меняется модуль вносимого напряжения  $U_{вн}$  относительно полезного сигнала (1 мВ): помеха от ЭМП соизмерима с полезным сигналом. Во-вторых, возникновение дрейфа сигнала датчика из-за изменений условий контроля – давление, температура окружающей среды, собственный нагрев датчика – эти факторы влияют на трансформаторный сигнал преобразователя. В-третьих, особенности монтажа датчика предполагают ограниченность пространства под чувствительный элемент, габариты которого составляют  $200 \times 40 \times 50$  мм, и значительное расстояние до объекта контроля – 15...30 мм.

Перечисленные трудности могут быть устранены несколькими путями. При гармоническом возбуждении для снижения дрейфов сигнала датчика применяется дифференциальный способ включения измерительных обмоток, а также амплитудно-фазовый метод отстройки от мешающих факторов. Влияние стальной рубашки кристаллизатора компенсируют путем выреза в ней отверстия под чувствительный элемент. Приведенные способы ведут к увеличению габаритов преобразователя и/или к значительной модификации кристаллизатора. Переход от гармонического возбуждения к импульсному позволяет упростить решение описанной проблемы.

**Импульсный способ возбуждения.** Импульсное возбуждение заключается в подаче на обмотку возбуждения напряжения прямоугольной формы [2–4]. С помощью измерительной обмотки регистрируется зависимость ЭДС от времени. В первый момент времени сигнал содержит только трансформаторную ЭДС. Далее на сигнал оказывает влияние воздушный зазор между

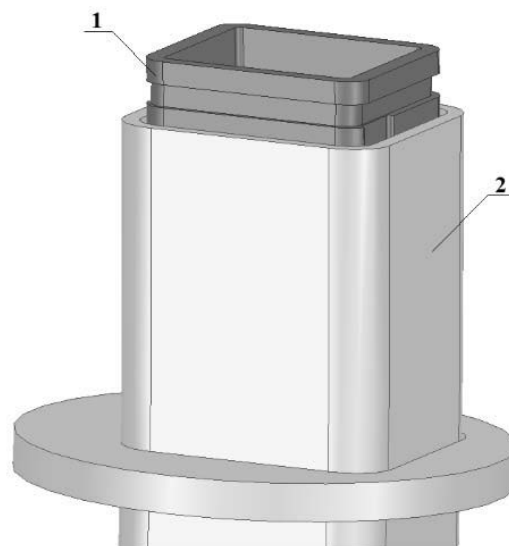


Рис. 1. Кристаллизатор: 1 – медная гильза; 2 – стальная рубашка

преобразователем и поверхностью контролируемого объекта. Затем послойно приходит информация об объекте контроля начиная с верхних слоев. Постоянная времени переходного процесса прямо пропорциональна электропроводности и магнитной проницаемости объекта контроля. Таким образом, появляется возможность разделить во времени трансформаторный сигнал и информативный сигнал от контролируемого объекта, а также проанализировать информацию об объекте послойно. При этом уходит необходимость в дифференциальном включении измерительных обмоток, что позволяет сделать датчик более компактным и при этом не имеющим дрейфов, связанных с трансформаторной ЭДС.

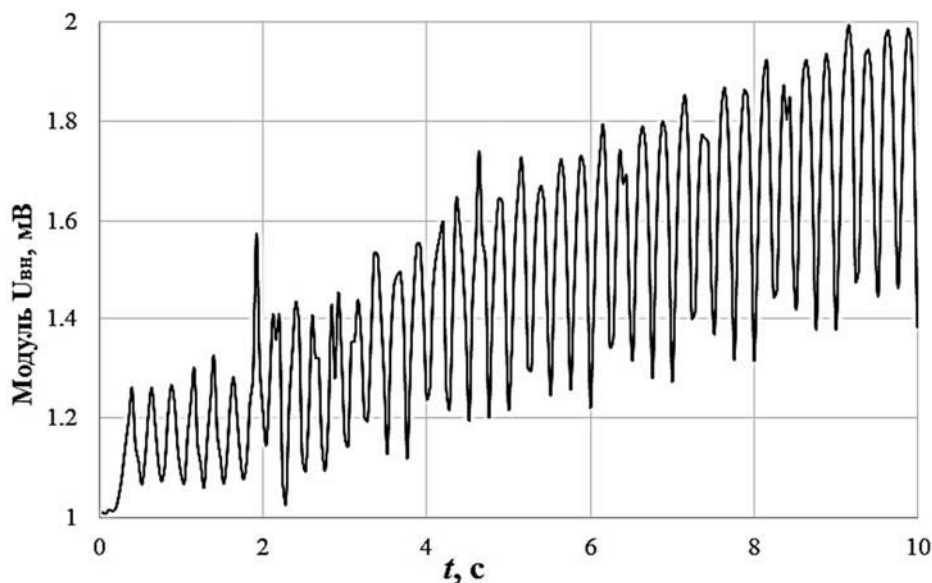


Рис. 2. Зависимость модуля  $U_{вн}$  от времени при включении ЭМП

Ранее рассматривалась задача снижения чувствительности датчика уровня металла к изменению магнитной проницаемости рубашки [1]. В рамках решения этой задачи проводились исследования импульсного возбуждения на примере двухслойного объекта контроля [5]. На рис. 3 приведены временные зависимости магнитного потока, которые иллюстрируют слабое влияние верхнего слоя  $\sigma_{п}$  на сигнал от нижнего слоя  $\sigma_{осн}$  контролируемого объекта в случае  $\sigma_{п} \ll \sigma_{осн}$  (кривая  $\sigma_{п} = 1$  МСм/м,  $\sigma_{осн} = 38$  МСм/м) спустя уже 1 %...5 % от постоянной времени переходного процесса. Таким образом, при импульсном возбуждении возможен независимый контроль свойств слоев объекта.

**Практическая реализация.** С учетом свойств импульсного возбуждения был разработан датчик уровня металла, модель которого представлена на рис. 4. Датчик состоит из двух печатных плат – протяженной обмотки возбуждения и набора измерительных обмоток. Датчик устанавливается на рубашку кристаллизатора из слабомагнитной стали ( $\sigma = 1$  МСм/м,  $\mu = 1 \dots 1,2$ ) и предназначен для регистрации вносимого напряжения от нагрева медной стенки кристаллизатора.

Полный сигнал вихретокового датчика уровня металла условно можно разделить на несколько составляющих, определяемых рядом факторов: трансформаторная ЭДС, электропроводность медной стенки и стальная рубашка. На

рис. 5 показаны эти составляющие за период возбуждения, за нулевой отсчет времени выбран момент по переднему фронту тока.

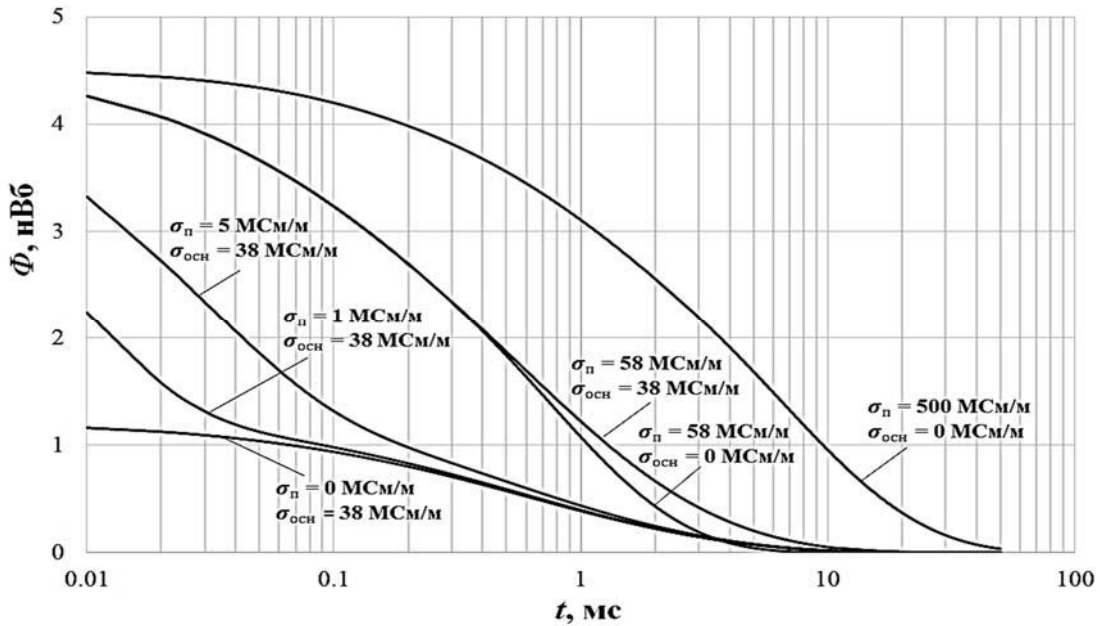


Рис. 3. Зависимости магнитного потока от времени [5]

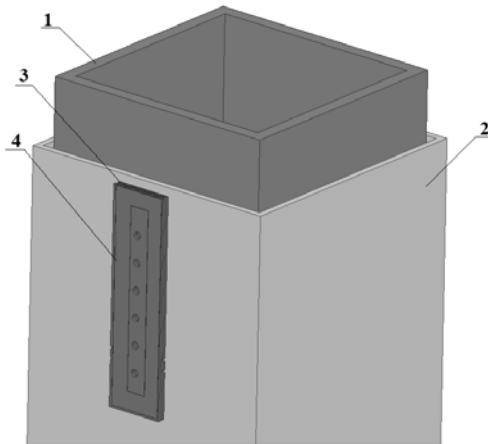


Рис. 4. Модель датчика: 1 – медная гильза; 2 – рубашка; 3 – плата измерительных обмоток; 4 – плата обмотки возбуждения

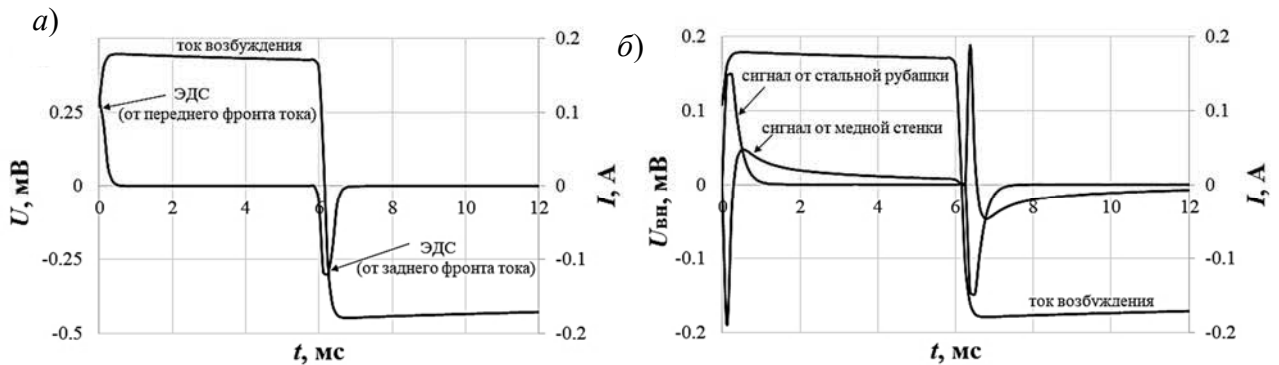


Рис. 5. Вихрековые сигналы при импульсном возбуждении: *a* – на воздухе; *б* – вносимые сигналы от рубашки и медной стенки

Постоянная времени переходного вихретокового процесса в стальной рубашке не превышает 0,3 мс, в то время как длительность переходного процесса в меди на порядок выше – 5 мс. Такое соотношение позволяет снизить влияние процессов в рубашке при исключении из обработки начального интервала времени после формирования импульса возбуждения. При таком подходе не исключается частотная фильтрация другого мешающего фактора – ЭДС в измерительных обмотках от поля ЭМП. После исключения интервала времени влияния рубашки на каждом полупериоде возбуждения сигнал проходит полосовую фильтрацию и преобразование Фурье для выделения гармоник на частоте возбуждения датчика.

Функциональность разработанного датчика уровня с импульсным возбуждением была подтверждена в промышленных условиях. На рис. 6 показано, как меняются временные зависимости модуля  $U_{\text{вн}}$  при включении ЭМП. Эффект от поля ЭМП остается, т. к. поле возбуждения зависит от магнитной проницаемости рубашки. Тем не менее его влияние синхронно во всех обмотках, а величина помехи составляет малую долю от полезного сигнала. В совокупности в результате измерений импульсным методом помеха от ЭМП снижается в 5 раз и не влияет на точность измерения уровня металла.

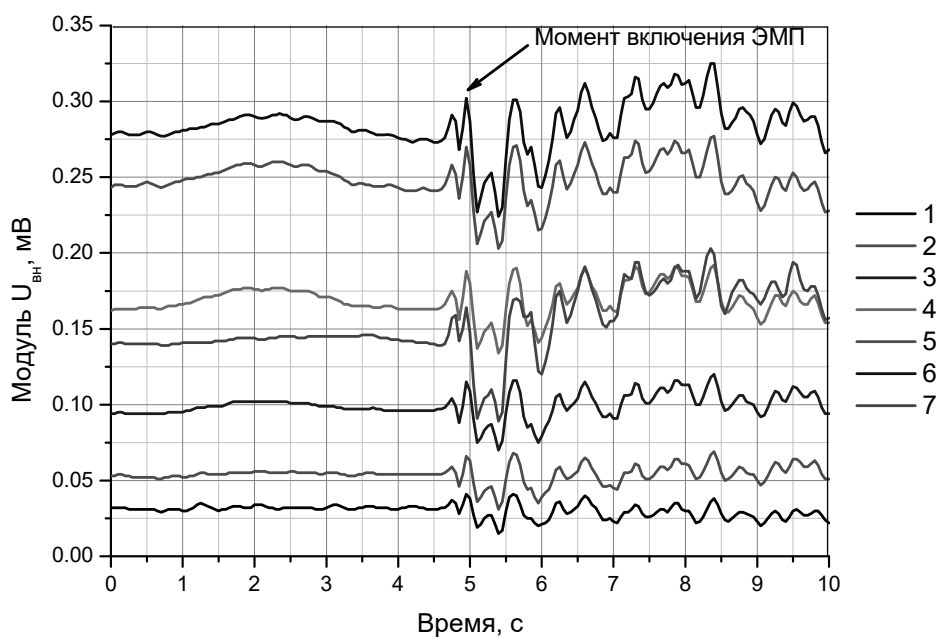


Рис. 6. Зависимость модуля  $U_{\text{вн}}$  от времени для всех измерительных обмоток

**Заключение.** В работе рассмотрен новый электромагнитный датчик с импульсным возбуждением, предназначенный для контроля уровня металла в сортовых кристаллизаторах при непрерывной разливке. Показаны основные преимущества применения импульсного возбуждения при проведении контроля

в сложных технологических условиях. Представленное техническое решение позволяет устранить влияние ряда мешающих факторов, таких как трансформаторный сигнал и его дрейф, сигнал от рубашки, магнитная проницаемость которой меняется внешним полем, при этом заметно сокращаются габариты датчика и улучшается технологичность его изготовления.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савин, И. С.** Снижение погрешности от ЭМП при измерении уровня расплава вихретоковым методом / И. С. Савин, И. В. Терехин // Датчики и системы. – 2017. – № 6. – С. 42–49.
2. **Sophian, A.** Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review / A. Sophian, G. Tian, M. Fan // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 30. – P. 500–514.
3. **Cheng, C. T.** Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements / C. T. Cheng, J. H. Rose, J. C. Moulder // Rev. Sci. Instrum. – 1996. – Vol. 67. – P. 3965–3972.
4. Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques / D. Zhang [et al.] // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 31. – P. 191–208.
5. **Терехин, И. В.** Контроль удельной электропроводности двухслойных немагнитных объектов импульсным вихретоковым методом / И. В. Терехин, Е. А. Славинская // Дефектоскопия. – 2019. – № 4. – С. 30–36.

E-mail: terekhin.iv@mail.ru, slavinskayacatherine@yandex.ru.