

УДК 621.3.082.744

## **СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ, ОКРУЖАЮЩИХ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДАТЧИК УРОВНЯ РАСПЛАВА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕМ**

*И. С. САВИН, Е. А. СЛАВИНСКАЯ, И. В. ТЕРЕХИН*

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.3.082.744

## **REDUCING MEASUREMENT ERROR CAUSED BY CHANGING THE MAGNETIC PROPERTIES OF OBJECTS LOCATED AROUND EDDY CURRENT METAL LEVEL SENSOR IN THE MOULD WITH ELECTROMAGNETIC STIRRER**

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

### **Аннотация**

В статье рассмотрена помеха от изменения магнитной проницаемости конструктивных элементов кристаллизатора при измерении уровня расплава вихрековым датчиком. Приводятся результаты промышленных испытаний матричного вихрекового датчика встроенного типа на двух металлургических предприятиях с двумя различными перемешивателями. По результатам испытаний предложен метод снижения погрешности.

### **Ключевые слова:**

электромагнитный перемешиватель стали, вихрековый датчик, измерение уровня стали, кристаллизатор.

### **Abstract**

In this paper measurement error caused by changing the magnetic permeability of constructive mould elements is considered. The results of industrial tests with electromagnetic stirrers are presented. According to the results error reduction method is suggested.

### **Key words:**

electromagnetic stirrer of steel, eddy current sensor, steel level measurement, mould.

### **Введение**

На сегодняшний день в металлургии широко применяются вихрековые датчики. Например, в машинах непрерывного литья заготовок вихрековый датчик измеряет уровень расплава в кристаллизаторе. В зависимости от типа датчика он устанавливается либо напротив медной стенки кристаллизатора (датчики встроенного типа) и измеряет уровень расплава по величине температуры медной стенки, либо над зеркалом расплава и

измеряет расстояние между чувствительным элементом и расплавом (штативные и краевые/бортовые датчики) [1].

Для улучшения качества стальной заготовки кристаллизатор часто оснащается электромагнитным перемешивателем (ЭМП). ЭМП представляет собой статор машины переменного тока, чаще всего с 3 парами полюсов. ЭМП создает вращающееся магнитное поле, которое индуцирует токи в расплаве. «Ротором» такого «асинхронного двигателя» является жидкая сталь. В результате перемешивания расплава улучшается качество слитка [2, 3].

ЭМП устанавливается в зоне выхода слитка из кристаллизатора. В обмотках ЭМП текут токи большой величины (100–500 А) и малой частоты (2–6 Гц). ЭМП создает помеху при измерении уровня расплава вихретоковым методом.

На данный момент исследование погрешности от ЭМП проводилось лишь в [4], где исследовалась наводка в измерительных катушках матричного вихретокового датчика встроенного типа. Кроме наводки помеха от ЭМП заключается и в другом явлении – изменении магнитной проницаемости  $\mu$  магнитных и слабомагнитных объектов, окружающих датчик. Таким объектом чаще всего является конструктив кристаллизатора из нержавеющей стали, на который устанавливается датчик.

В рекламных материалах фирм Ergolines (Италия), Danieli (Италия) и VUNZ (Чехия) указывается, что вихретоковые датчики этих производителей работоспособны с ЭМП, но нигде в литературе нет данных о том, как этот результат был достигнут. Данная статья восполняет этот пробел.

В работе приводятся результаты экспериментального исследования в промышленных условиях погрешности от изменения магнитных свойств объектов, окружающих датчик.

### **Существо проблемы**

Негативное влияние ЭМП при измерении уровня расплава вихретоковым датчиком проявляется в 2 моментах:

- 1) наведение ЭДС в измерительных обмотках;
- 2) изменение  $\mu$  объектов, окружающих датчик.

Влияние ЭМП на показания датчика исследовалось на двух металлургических предприятиях с двумя различными ЭМП (Завод №1 и Завод №2). На заводах использовались 2 схожих по конструкции матричных вихретоковых датчика встроенного типа. Датчики состоят из одной большой накладной обмотки возбуждения и ряда измерительных обмоток. Число измерительных обмоток 10 штук (верхняя №1, нижняя №10). Измерительные обмотки расположены с шагом 20 мм. Оси измерительных обмоток параллельны оси обмотки возбуждения.

В первом случае датчик установлен в блюмовый кристаллизатор внутренним сечением 370х310 мм на плиту из слабомагнитной нержавеющей стали (рис. 1).



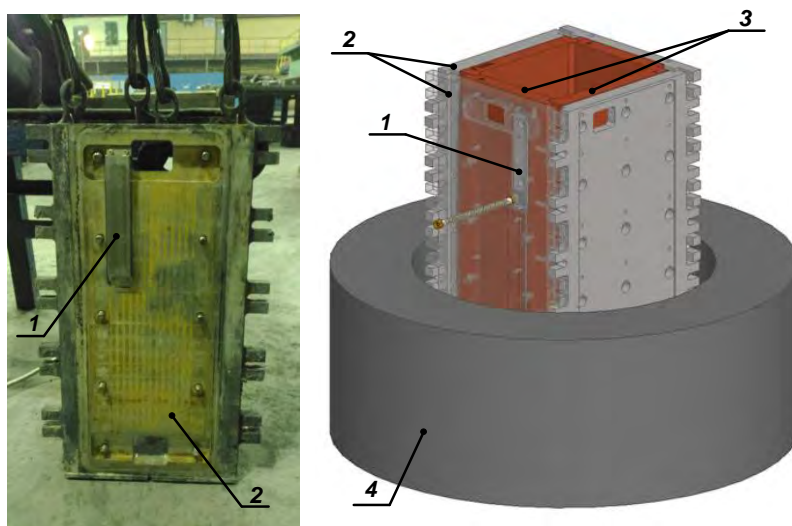


Рис. 1. Датчик, установленный на плиту из нержавеющей стали блумового кристаллизатора (Завод №1): 1 – датчик; 2 – плита из нержавеющей стали; 3 – медная стенка; 4 – корпус ЭМП

Во втором случае датчик установлен в трубный кристаллизатор с внутренним диаметром медной гильзы 156 мм на рубашку из слабомагнитной нержавеющей стали (рис. 2). В обоих случаях расстояние от оси нижней измерительной обмотки до корпуса ЭМП составляет 300–310 мм.

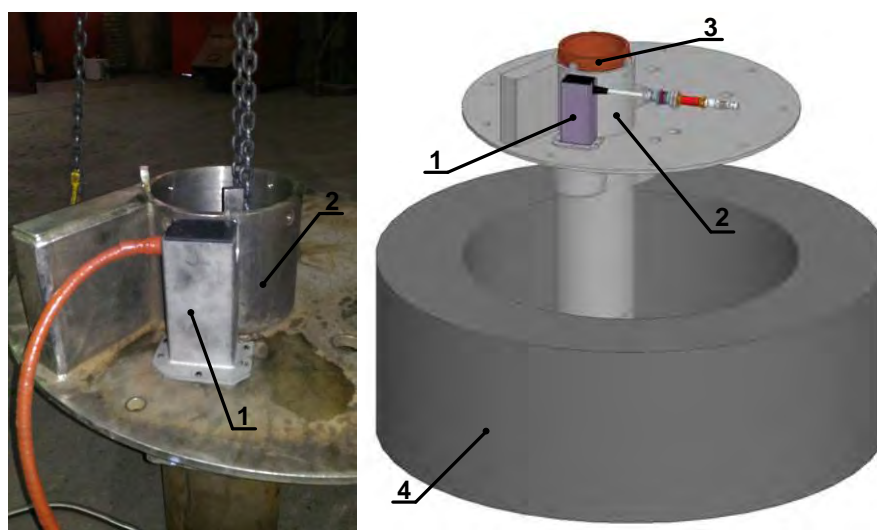


Рис. 2. Датчик, установленный на рубашку из нержавеющей стали трубного кристаллизатора (Завод №2): 1 – датчик; 2 – рубашка из нержавеющей стали; 3 – медная гильза; 4 – корпус ЭМП

Основной помехой при измерении уровня с работающим ЭМП является изменение  $\mu$  объектов, находящихся вблизи датчика. Датчик встроенного (и краевого) типа устанавливается на конструктив из нержавеющей стали, который обладает слабыми магнитными свойствами.

Для объяснения сути проблемы рассмотрим упрощенную систему, состоящую из трех элементов:

1) объект из слабомагнитной нержавеющей стали, на который устанавливается датчик;

2) вихретоковый датчик;

3) одна пара полюсов ЭМП (Для простоты понимания ЭМП с 3 парами полюсов заменяется одной парой. Такой «упрощенный» ЭМП создает пульсирующее магнитное поле, а не вращающееся.)

На рис. 3 схематично изображена кривая намагничивания стали. Т. к. в литературе нет данных о кривых намагничивания слабомагнитных нержавеющей сталей, то для объяснения физики процесса будем пользоваться данной кривой, полагая, что для нержавеющей стали качественно она похожа. Также примем допущение, что петля гистерезиса нержавеющей стали очень узкая и практически совпадает с основной кривой намагничивания. Ниже кривой намагничивания на рис. 3 изображен период тока в фазе ЭМП. В обмотках ЭМП текут токи малой частоты. Величины токов находятся в пределах 100–500 А. Из-за этих токов в окружающем пространстве изменяется напряженность магнитного поля. Токи возбуждения датчика малы (менее 4 А) и практически не изменяют напряженности поля. Напряженность магнитного поля изменяется во времени пропорционально току ЭМП. Каждому моменту времени на графике тока ЭМП соответствует рабочая точка с определенной индукцией  $B$  и  $\mu$  на кривой намагничивания.

Справа от кривой намагничивания на рис. 3 изображена зависимость изменения индукции от времени, определенная графическим методом. Из-за симметричности кривой намагничивания относительно начала координат график зависимости индукции от времени симметричен относительно оси абсцисс.

Относительная магнитная проницаемость вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}.$$

Таким образом,  $\mu$  изменяется циклично с частотой, равной удвоенной частоте тока ЭМП. Зависимость  $\mu$  от времени изображена пунктиром на рис. 3. В моменты времени, когда ток ЭМП равен нулю,  $\mu$  равна начальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{нач}}$ .



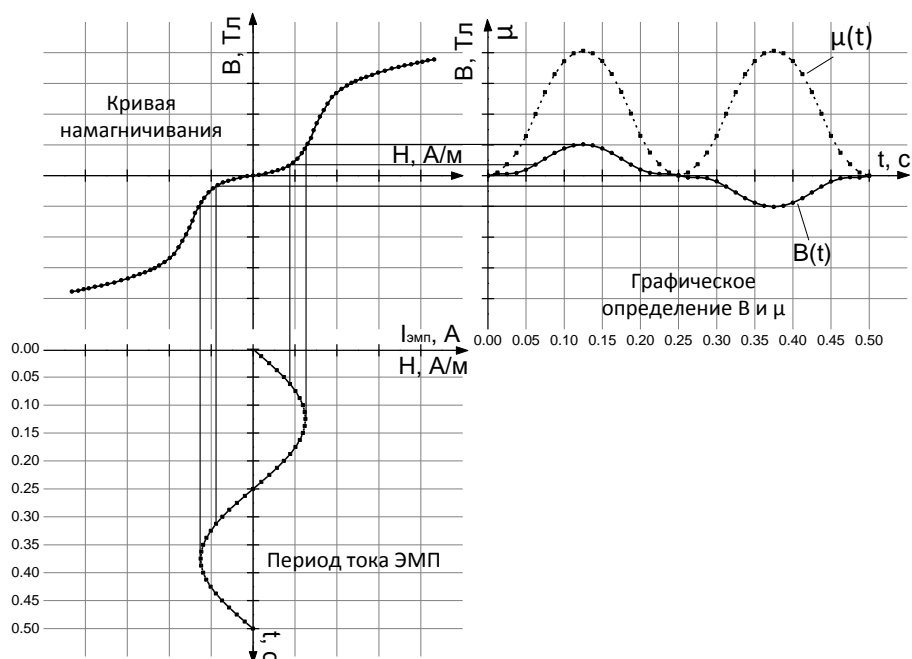


Рис. 3. Графическое определение  $\mu$

Напротив объекта, у которого циклично изменяется  $\mu$ , установлен вихрековый датчик, создающий свое переменное поле возбуждения, которое наводит вихревые токи в этом объекте. Таким образом, в ЭДС измерительной катушки на частоте тока возбуждения появляется составляющая, модулированная формой изменения  $\mu$ .

На рис. 4 показана зависимость модуля  $U_{вн}$  при включении ЭМП. Ток ЭМП изменялся от 0 до установившегося значения (300 А) в течение 10–12 с. Видно, что в сигнале датчика присутствует составляющая с частотой, равной удвоенной частоте ЭМП.

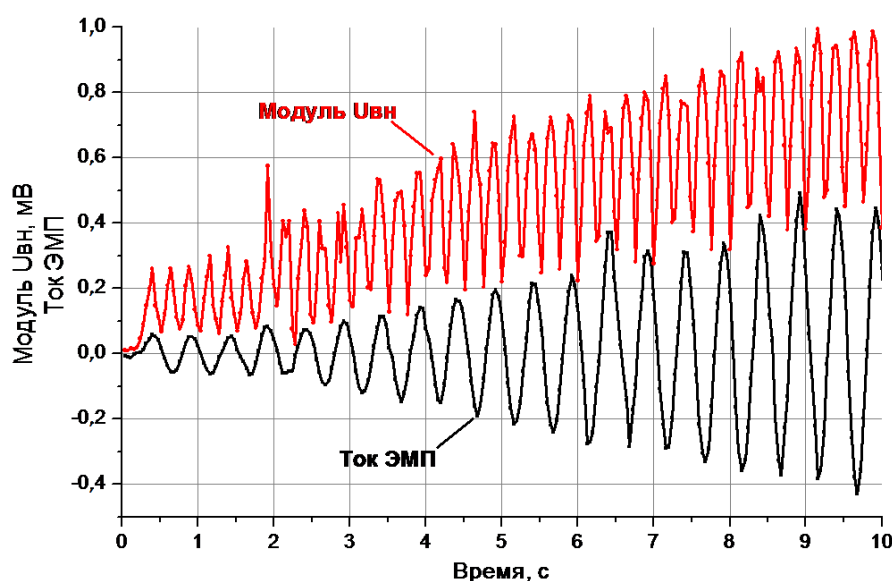


Рис. 4. Зависимость модуля  $U_{вн}$  от изменения  $\mu$  в 10 измерительной обмотке (дифференциальное включение) при включении ЭМП (Завод №1)

## Снижение помехи от ЭМП

Наилучшим способом снижения помехи от изменения  $\mu$  является установка датчика дальше от магнитных объектов или экранирование их от попадания поля возбуждения датчика.

В случае установки датчика, как на Заводе №2, следует дорабатывать рубашку, с целью установки вставки из немагнитного материала, на которую будет устанавливаться датчик. В случае установки датчика, как на Заводе №1, в плите из нержавеющей стали, на которую устанавливается датчик, следует делать выборку. В месте выборки, в случае необходимости, может быть установлен экран, который будет препятствовать наведению вихревых токов от возбуждения в плите.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mörmann.** Recent progress in fast and accurate meniscus level measurement for continuous casting machines / Mörmann, J. Schmid, S. Spagnul. // Proc. 7th European Continuous Casting Conference (ECCC) 2011, 27 June – 1 July 2011, Dusseldorf.

2. **Бейтельман, Л.** Улучшение качества сортовых заготовок путем электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе / Л. Бейтельман // Сталь. – 1997. – № 4.

3. **Боровски, А.** Применение электромагнитного перемешивателя на МНЛЗ / А. Боровски, Й. Сарторис, Р. Юргенс // Черные металлы. – 1998.

4. **Терехин, И. В.** Разработка вихретоковых средств контроля уровня жидкого металла в гильзовом кристаллизаторе при непрерывной разливке стали : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. : 2008.

E-mail: [Igorkoff@inbox.ru](mailto:Igorkoff@inbox.ru)

[terekhin.iv@mail.ru](mailto:terekhin.iv@mail.ru)

[carpe\\_ugulum@mail.ru](mailto:carpe_ugulum@mail.ru)