

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА УРОВНЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Красницкий Р.А., группа АТ-00

Руководитель доц. Суков С.Ф.

Система автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторе (САПУМК) МНЛЗ является одной из основных при разливке стали, определяющей качество получаемого слитка.

Типовым составом САПУМК является датчик уровня металла (ДУМ), содержащий первичный преобразователь, преобразующий перемещение уровня металла в электрический сигнал, и вторичный преобразователь, формирующий нормированный выходной сигнал. Проблемам моделирования такого датчика и посвящена данная статья.

Рассмотрим принцип взаимодействия индукционного датчика с мениском жидкого металла на примере системы катушек с общей осью. Для упрощения выводов, рассмотрим систему с катушками, продольными размерами которых можно пренебречь. Будем в дальнейшем считать, что излучающая и приемная катушки представляют собой круглые бесконечно тонкие рамки (рис. 1).

Рисунок 1 - Модель излучающей катушки

Для такой рамки вектор магнитного момента при протекании тока  $I$  имеет вид:

$$\vec{P}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}_S, \quad (1)$$

где  $S$  - площадь рамки;

$\vec{n}_S$  - вектор нормали к плоскости рамки.

Индукция магнитного поля, создаваемого такой рамкой на большом расстоянии  $r$  от ее центра (рис. 2), составляет:

$$\begin{cases} \vec{B}_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\vec{P}_m}{r^3} \cdot \cos \beta, \\ \vec{B}_\tau = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\vec{P}_m}{r^3} \cdot \sin \beta, \\ \vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{\vec{P}_m}{r^3}; \end{cases} \quad (2)$$

Предполагаем, что  $r \gg \sqrt{S}$  и индексы "n", "τ" обозначают соответственно нормальную и тангенциальную составляющие вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Рисунок 2 - Компоненты вектора индукции магнитного поля  
излучающей катушки

Опишем принцип измерения уровня расплавленного металла в кристаллизаторе индукционным методом. В излучающую катушку с числом

витков  $n$  поступаєт переменный ток  $I$  от источника питания, который генерирует магнитное поле  $\vec{B}_a$  (2) и электродвижущую силу  $\varepsilon$  :

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B}_a \cdot n \cdot dS \quad (3)$$

Эта э.д.с. формирует замкнутый индуцированный ток  $I_i$ , величина которого определяется по закону Ома. В соответствии с законом Ленца, индуцированный ток  $I_i$  имеет такое направление, чтобы компенсировать изменение магнитного потока, вызвавшего этот ток. Поэтому его направление противоположно току излучающей катушки и вектор индукции наведенного магнитного поля  $\vec{B}_i$  так же направлен против вектора индукции излучающей катушки  $\vec{B}_a$ .

Вектор индукции наведенного магнитного поля  $\vec{B}_i$  имеет две составляющие: радиальную  $B_i^r$  и осевую  $B_i^z$ .

$$\vec{B}_i = B_i^r \cdot \vec{r} + B_i^z \cdot \vec{z} \quad (4)$$

$$B_i^r = \mu_0 \cdot I_i \cdot \frac{2z}{r \cdot \sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \cdot \left[ -K(m) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} \cdot E(m) \right] \quad (5)$$

$$B_i^z = \mu_0 \cdot I_i \cdot \frac{2z}{r \cdot \sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \cdot \left[ K(m) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} \cdot E(m) \right] \quad (6)$$

Здесь обозначены:

$\mu_0$  – магнитная проницаемость в вакууме;

$r$  - радиус излучающей катушки;

$a$  - радиус проводника катушки;

$z$  - расстояние между излучающей катушкой и мениском жидкого металла;

$K(m)$ ,  $E(m)$  – полные эллиптические интегралы первого и второго порядков, соответственно;

$m$  – коэффициент, вычисляемый в соответствии с равенством (7)

$$m = 4 a r \cdot [(a + r)^2 + z^2]^{-1} \quad (7)$$

Формулы (4) – (6) показывают, что при изменении уровня металла, изменяется расстояние  $z$ , что приводит к изменению индуцированного магнитного поля  $\vec{B}_i$ . Приемная катушка, расположенная вблизи от мениска жидкого металла воспринимает эти изменения магнитного поля в виде изменения напряжения на выводах приемной катушки:

$$V = - \frac{d}{dt} \int_{S_1} (\vec{B}_a + \vec{B}_i) \cdot \vec{n} \cdot dS_1 \quad (8)$$

где интегрирование проведено по области  $S_1$  приемной катушки.

Если взаимное расположение катушек датчика и кристаллизатора зафиксировать, то влияние излучающей катушки будет постоянным и его можно компенсировать. Тогда напряжение на выходе датчика (напряжение на выводах приемной катушки) будет зависеть только от вариации уровня жидкого металла.

В соответствии с равенством (8), на выходной сигнал индукционного датчика уровня жидкого металла влияет только воздействие индуцированного тока. Но это утверждение, справедливо только при постоянных внешних для датчика факторов:

- магнитном моменте  $P_a$  излучающей катушки;
- амплитуды и частоты питающего напряжения ( $a$ , следовательно, тока) излучающей катушки;
- удельной проводимости жидкой стали;

- геометрических размеров конструкции датчика и кристаллизатора.

Если данные внешние факторы не учесть, то в выходном сигнале датчика они проявятся и исказят истинный результат. Поэтому был проведен ряд экспериментов по оценке влияния этих факторов и исследованию путей их устранения. Для этого был изготовлен экспериментальный стенд, который содержал модель кристаллизатора и чувствительного элемента, выполненную в масштабе по отношению к промышленным узлам. Загрузка кристаллизатора имитировалась «холодной завалкой» - загрузкой специально изготовленных металлических образцов из нержавеющей стали и олова.

Датчик – приемная катушка диаметром 5 мм, с числом витков – 80, выполненных медным проводом диаметром 0,5 мм на керамическом стержне длиной 10 мм. Его назначение – измерение нормальной и тангенциальной составляющих к оси кристаллизатора локального магнитного поля периферии кристаллизатора.

Были измерены нормальная и тангенциальная к оси кристаллизатора составляющие индуцированного магнитного поля. На рис. 3 показаны результаты измерения при холодной завалке блока нержавеющей стали.

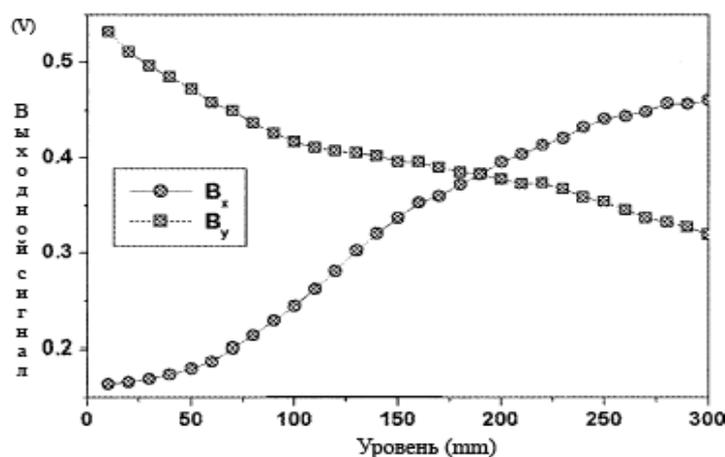


Рисунок 3 – Выходной сигнал локального датчика для тангенциальной  $B_x$  и нормальной  $B_y$  составляющих при вариации уровня

Очевидно однозначное соответствие изменений уровня в пределах 0-300 мм и изменений нормальной и тангенциальной компонент.

Эксперименты продемонстрировали:

1. Полную состоятельность индукционного метода для разработки датчика уровня жидкого металла в кристаллизаторе;

2. Применение холодной завалки при моделировании процессов измерения уровня металла в кристаллизаторе является эффективным методом для исследования факторов, влияющих на показания индукционного датчика;

3. Глобальный датчик показал лучшее соотношение сигнал/шум, а его сигнал может быть инвариантным к паразитным факторам излучающей катушки, если использовать эталонное напряжение для регулирования источника питания катушки;

4. Все отличия между фактическим значением уровня металла и показаниями индукционного датчика могут быть скорректированы путем программной обработки.

5. Натурные испытания показывают, что точность индукционного датчика составляет 0,2 мм при вариациях уровня металла в пределах 0 – 300 мм и частоте магнитного поля 20 кГц.

#### Перечень ссылок

1. Разливка стали / Под ред. В.И. Бантизманского. – К. – Донецк: Вища шк., 1977. – 200 с.

2. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. - М.: Металлургия, 1991. – 272 с.

3. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов. - М.: Металлургия, 1970. – 412 с