

УДК 537.31, 537.85  
PACS 07.07.Df

## Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов

Г. Л. Лосев, В. А. Ельтищев

Институт механики сплошных сред УрО РАН  
614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1  
email: losev.g@icmm.ru

В работе представлены разработанные электромагнитные неинвазивные датчики уровня и электропроводности цветных и щелочных металлов. Экспериментально определено влияние геометрии установок на точность измерений. Установлены пределы допустимых ошибок позиционирования датчиков относительно анализируемых объемов металлов.

**Ключевые слова:** измерение проводимости; датчик уровня; электромагнитные датчики

*Поступила в редакцию 09.10.2020; принята к опубликованию 04.12.2020*

## Electromagnetic measurement of level and conductivity of non-ferrous metals

G. L. Losev, V. A. Eltishchev

Institute of continuous media mechanics UB RAS  
Academ. Koroleva str., 1, 614013, Perm  
email: losev.g@icmm.ru

The paper presents the developed electromagnetic non-invasive level and electrical conductivity sensors for non-ferrous and alkali metals. The influence of the geometry of the installations on the measurement accuracy was experimentally determined. The limits of permissible errors in the positioning of the sensors relative to the analyzed volumes of metals are established.

**Keywords:** conductivity measurement; level sensor; electromagnetic sensors

*Received 09.10.2020; accepted 04.12.2020*

doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-63-68

### 1. Введение

Задачи контроля чистоты и уровня металлических расплавов являются актуальной проблемой современной цветной металлургии. Наиболее полно это можно наблюдать на примере производства титана. Металлический титан получают в виде губки, образующейся в ходе реакции расплавленного хлорида титана с металлическим магнием в жидком состоянии. В ходе технологического про-

цесса происходит постепенное вливание хлорида титана в реактор. В ходе химических превращений образуется выпадающий в осадок титан и смесь расплавов избытка металлического магния и хлорида магния. По достижении определённого уровня титана металл выгружают, после чего повторяется процесс загрузки хлорида титана. Основной сложностью технологического процесса является тот факт, что уровень металлического титана остается неизвестен на протяжении всего процесса

производства вплоть до момента выгрузки конечного продукта [1, 2]. Дополнительно осложняют процесс многофазный состав и прохождение химических реакций в расплавах. Таким образом, достаточно сложно установить количество реагентов в ходе получения чистого металла.

В силу экстремальных условий в титаномагнелиевых реакторах, а именно, высокие (более 700°C) температуры и химическая активность реагентов, оптические, ультразвуковые и контактные методы измерения уровня отдельных фаз оказываются неприменимы. В то же время электромагнитные методы позволяют не только определять уровень, но и проводимость металлов и их расплавов [3, 4].

Последнее особенно важно, поскольку проводимость металлов и полупроводников напрямую связана с их химическим составом [5].

В настоящей статье мы рассматриваем электромагнитные устройства измерения проводимости и уровня металлов, основанные на измерении отклика вихревых токов, индуцируемых в проводящей среде без непосредственного контакта с ней. Поскольку величина отклика зависит от интегральной проводимости анализируемого объёма проводника, один и тот же датчик может использоваться как для определения уровня однофазной проводящей среды, так и для измерения проводимости (т.е. химического состава) многофазного проводника.

Разрабатываемые датчики найдут применение как в металлургии, например, для контроля уровня металла в титановых реакторах или алюминиевых электролизёрах, а также контроля качества (чистоты металла) выпускаемого сырья, так и в энергетике для контроля чистоты жидкометаллического теплоносителя.

## 2. Экспериментальная установка

Разрабатываемый датчик представляет собой три коаксиально расположенных катушки, размещённых на непроводящем каркасе и разнесённых в пространстве. С помощью центральной катушки происходит генерация магнитного поля, а две крайние катушки являются измерительными. Согласно закону Фарадея, создаваемое генерирующей катушкой переменное магнитное поле будет индуцировать ЭДС в измерительных катушках. Если с одной стороны от датчика располагается электропроводящая среда, то переменное магнитное поле генерирующей катушки приведёт к образованию вихревых токов в среде. Вихревые токи, в свою очередь, порождают собственное вторичное магнитное поле, которое регистрируется измерительными катушками. Явление генерации вихревых токов и вторичных электромагнитных полей лежит в основе скин-эффекта. Принцип суперпозиции магнитных полей указывает, что ЭДС  $U_1$ , создаваемая в измерительной катушке, располо-

женной ближе к проводящей среде, будет ниже, чем ЭДС  $U_2$  в оппозитно расположенной катушке. В случае же отсутствия проводящей среды потенциалы на обеих катушках будут эквивалентны. Вообще говоря, разность ЭДС в измерительных катушках пропорциональна эффективной электропроводности среды. Выходным аналоговым сигналом датчика является разность индуцированных в измерительных катушках напряжений:

$$\varepsilon = \text{RMS}(U_2) - \text{RMS}(U_1). \quad (1)$$

Для исследования разных аспектов применения датчика были собраны две экспериментальные установки. Основное отличие заключается в интерпретации выходного сигнала  $\varepsilon$ .

### 2.1. Измерение проводимости среды

Установка состоит из трёх коаксиально расположенных катушек: одной генерирующей и двух измерительных. Катушки намотаны на непроводящий каркас из фторопласта. Внешний диаметр каркаса составляет 118 мм, внутренний диаметр – 73 мм. Длина центральной генерирующей катушки – 20 мм, длина измерительных катушек составляет 10 мм. Высота намотки всех катушек – 20 мм. Генерирующая катушка намотана эмалированным медным проводом диаметром 1.3 мм и состоит из 250 витков. Измерительные катушки содержат по 500 витков эмалированного медного провода диаметром 0.13 мм.

В качестве модельных электропроводящих сред используются цилиндры из химически чистых меди и алюминия. Расположение металлического образца относительно измерительной системы схематически представлено на рис. 1.

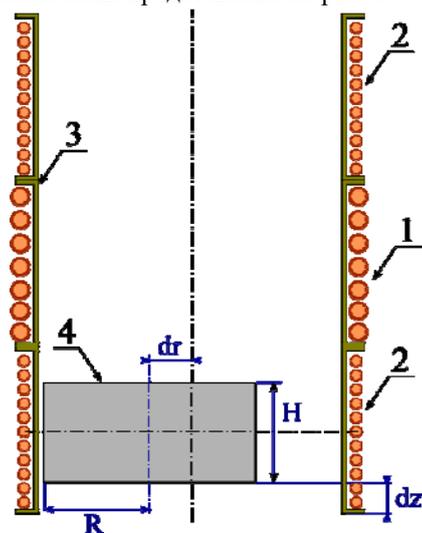


Рис. 1. Принципиальная схема размещения металлического образца в измерительной системе: 1 – генерирующая катушка; 2 – измерительные катушки; 3 – фторопластовый каркас; 4 – металлический образец

Высота металлического образца  $H_0 = 20.0$  мм; радиус образца  $R_0 = 36.0$  мм. Нижний индекс  $X_0$  обозначает величину в начальной конфигурации системы. Если специально не указано иное, все геометрические параметры имеют начальные параметры  $H_0, R_0, dr_0 = 0, dz_0 = 0$ . То есть нижний край металлического образца находится на том же уровне, что и граница обмоток измерительной системы, оси симметрии образца и катушек совпадают. Вариация геометрических параметров осуществляется в отдельных опытах для выявления влияния неточности установки и геометрических размеров образца на точность восстановления проводимости.

Питание центральной генерирующей катушки осуществляется от генератора ГЗ-109. Для измерения тока и напряжения используются платы сбора данных National Instruments NI9225 (отношение сигнал/шум  $2 \text{ мВ}_{\text{rms}}$ ) и NI9227 (отношение сигнал/шум  $400 \text{ мкА}_{\text{rms}}$  на частоте 50 Гц). Сбор данных производился в среде LabView. Обработка результатов проводилась в программной среде GNU Octave.

## 2.2. Измерение уровня металла

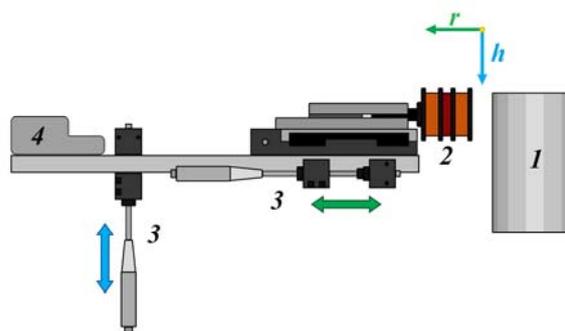
Установка для определения уровня проводящей среды отличается геометрическими параметрами катушек датчика и его расположением относительно проводящей среды (принципиальная схема приведена на рис. 2).

Экспериментальная установка состоит из проводящего дюралюминиевого цилиндра  $I$ , параллельно боковой стенке которого располагается датчик уровня  $2$ . Датчик изготовлен с помощью 3D принтера из ABS-пластика. Он состоит из одной генерирующей и двух измерительных катушек, которые расположены соосно. Внешние размеры датчика  $72 \times 42 \times 46 \text{ мм}^3$ . Генерирующая катушка имеет ширину 6 мм и состоит из 50 витков провода ПЭИД2-200 сечением  $1 \text{ мм}^2$ . Каждая измерительная катушка содержит по 1300 витков эмалированного провода сечением  $0.07 \text{ мм}^2$  и обладает шириной 10 мм. С целью выделения преимущественного направления для измерения уровня проводящей среды перпендикулярное центральной оси вертикальное сечение катушки имеет форму овала.

Для точного позиционирования датчика измерительная система размещается на микрометрических платформах  $3$ , которые позволяют с точностью  $0.01 \text{ мм}$  перемещать датчик вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений на расстояния до  $50.00 \text{ мм}$  по каждой из осей.

Процесс оцифровывания экспериментальных данных осуществляется с помощью платы сбора данных  $4$  компании National Instruments. Питание измерительной системы, процесс сбора и средства

обработки экспериментальных данных аналогичны предыдущему пункту.



**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения уровня металла: 1 – тестовый объем проводящей среды; 2 – датчик уровня; 3 – микрометрические платформы; 4 – плата сбора данных

## 3. Измерение проводимости металлов

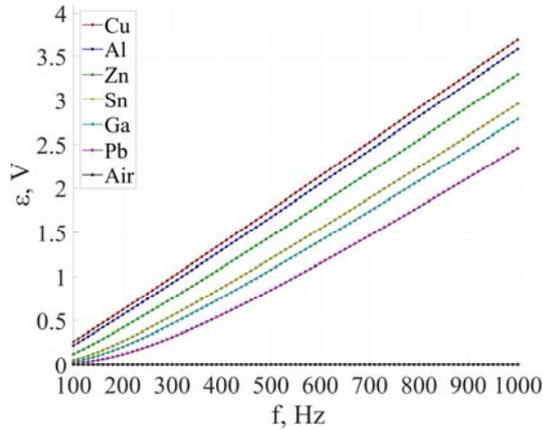
Как было отмечено ранее, уровень выходного сигнала датчика напрямую связан с проводимостью электропроводящей среды. Основываясь на законах электромагнитной индукции и уравнениях Максвелла, можно ожидать, что выходной сигнал  $\varepsilon$  будет тем выше, чем выше частота генерируемых датчиком электромагнитных полей. На рис. 3 приведены зависимости разности ЭДС  $\varepsilon$ , генерируемых в измерительных катушках датчика, от частоты  $f$  питающего тока. Сила тока поддерживалась постоянной и равной  $1.5 \text{ А}$ .

Хорошо видно, что зависимости  $\varepsilon(f)$  имеют характер близкий к линейному. При этом уровень наклона прямых определяется проводимостью металла – чем выше электропроводность, тем больший угол образует график  $\varepsilon(f)$  с осью абсцисс.

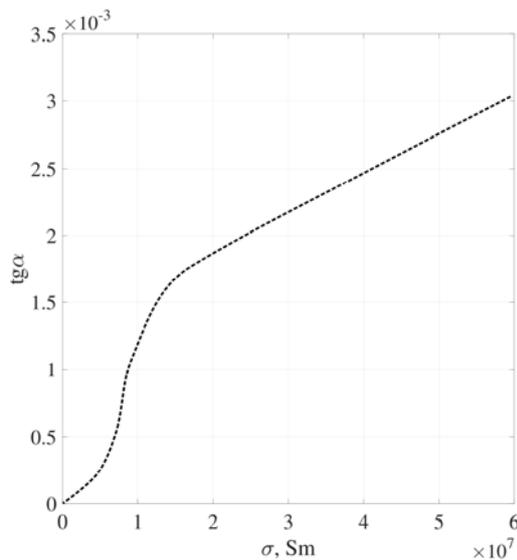
Рис. 3 наглядно демонстрирует изменение угла наклона зависимости  $\varepsilon(f)$  с изменением проводимости анализируемого металла. Полученные кривые могут быть использованы в качестве эталонных значений выходного сигнала датчика. Для измерения проводимости образца неизвестной электропроводности необходима нормировочная кривая, связывающая угол наклона полученной экспериментально ЭДС с известными значениями электропроводности.

На рис. 4 приведена зависимость тангенса угла наклона кривых  $\varepsilon(f)$  от электропроводности анализируемой среды при заданных и постоянных геометрических параметрах измерительной системы. Полученная кривая позволяет анализировать металлические сплавы в широком диапазоне электропроводностей. В частности, возможно как измерение электропроводности неизвестных металлических сплавов, так и оценка химической

чистоты (наличия примесей) металлов из представленного списка, поскольку проводимость металлов прямо связана с содержанием химических примесей.



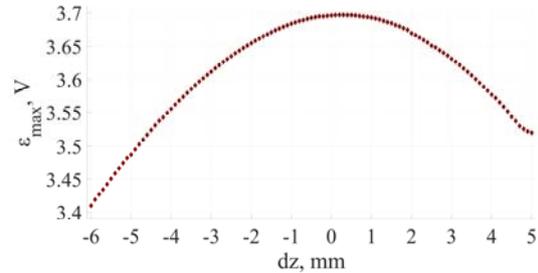
**Рис. 3.** Зависимость выходного сигнала датчика от частоты питающего тока для нескольких материалов сердечника



**Рис. 4.** Зависимость тангенса угла наклона графиков индуцируемой разности ЭДС от проводимости анализируемого металлического образца

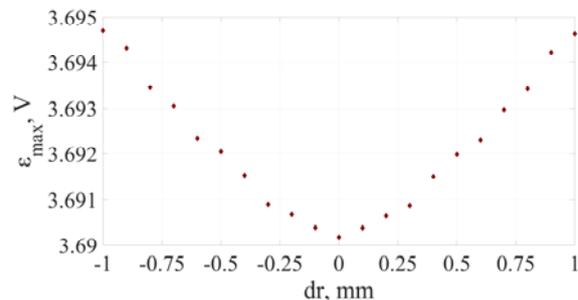
Основным вопросом практического применения датчика является проблема точности измерений. Очевидно, что помимо шумов непосредственно электромагнитной природы, сильное влияние на уровень выходного сигнала будет оказывать изменение геометрических параметров измерительной системы. Для выяснения этого влияния были получены зависимости максимума разности генерируемых в измерительных катушках ЭДС от положения металлического образца

относительно измерительных катушек. Измерения проводились с медным образцом, поскольку высокая электропроводность меди обеспечивает максимальную чувствительность датчика к неточностям геометрических параметров.



**Рис. 5.** Зависимость максимума разности наведённых ЭДС от смещения металлического образца вдоль оси измерительной системы

На рис. 5 приведена зависимость максимума наведённых ЭДС от смещения металлического образца вдоль оси измерительной системы. Смещение образца постоянной проводимости вдоль оси катушек эквивалентно изменению эффективной проводимости образца. Данная зависимость имеет квадратичный характер в диапазоне  $\pm 5$  мм относительно максимального значения.



**Рис. 6.** Зависимость максимума наводимой ЭДС от смещения металлического образца вдоль радиуса измерительной катушки. Изменение знака  $dr$  соответствует прохождению оси металлического образца через ось измерительной системы

Отклонения от квадратичного закона происходят лишь при внесении сердечника внутрь генерирующей катушки в силу проявления нелинейных эффектов генерации вторичных полей.

Смещение образца вдоль радиуса системы катушек также способно внести искажения в распределение электромагнитных полей и, как следствие, в выходной сигнал датчика. На рис. 6 представлена зависимость максимума разности наводимых ЭДС от смещения  $dr$  образца вдоль радиуса измерительной катушки. Изменение знака  $dr$  подразумевает прохождение геометрического центра образца через ось измерительной катушки при движении вдоль диаметра последней.

Полученные зависимости разности индуцируемых ЭДС  $\varepsilon$  от параметров позиционирования измерительной системы позволяют сделать вывод, что для обеспечения погрешности восстановления проводимости в пределах 1% в диапазоне проводимостей 20–60 МСм (линейный участок на рис. 4) необходимо обеспечение абсолютной погрешности позиционирования образца не более 1 мм по радиусу и 0.1 мм по высоте.

#### 4. Измерение уровня металла

Как и в случае датчика проводимости, величина выходного сигнала датчика уровня определяется интегральной электропроводностью объёма, охватываемого магнитным полем датчика. В данном случае изменение интегральной электропроводности происходит за счёт изменения уровня металла (изменение доли измерительного объёма, занятой проводником).

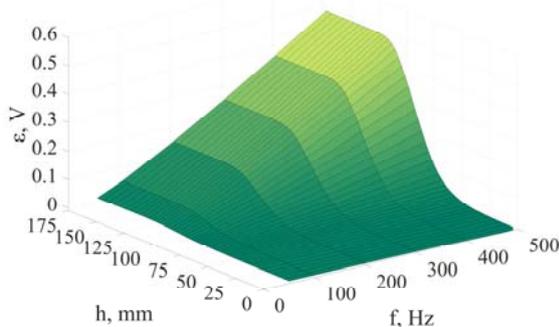


Рис. 7. Зависимость наводимой ЭДС от частоты питающего тока и уровня металла

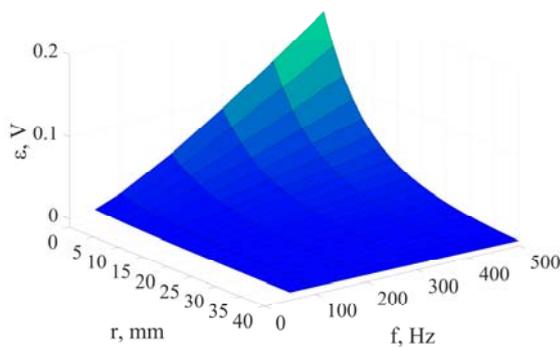


Рис. 8. Зависимость наводимой ЭДС от частоты питающего тока и расстояния от датчика уровня до металлического объёма

На рис. 7 показана зависимость разности ЭДС  $\varepsilon$  от уровня высоты  $h$  модельного металлического объёма и частоты  $f$  генерируемого датчиком переменного магнитного поля. Действующее значение переменного тока, протекающего через генерирующую катушку, во всех экспериментах является постоянным и равным 1.5 А.

Следует отметить, что на границе электропроводящей среды ( $h = 80.0$  мм) зависимость

$\varepsilon(f)|_{h=const}$  достигает некоторого постоянного значения.

Также наблюдается экспоненциальное затухание амплитуды выходного сигнала  $\varepsilon$  с увеличением расстояния между датчиком и проводящим цилиндром. На рис. 8 показана зависимость  $\varepsilon$  от расстояния  $r$  до проводника и частоты питающего тока на границе электропроводящей среды ( $h = 0$ ). Необходимо добавить, что относительная погрешность измеряемых параметров не превышает 1%.

Объединение полученных результатов позволяет сделать выводы о точности измерений уровня металлов в зависимости от погрешности позиционирования датчика уровня.

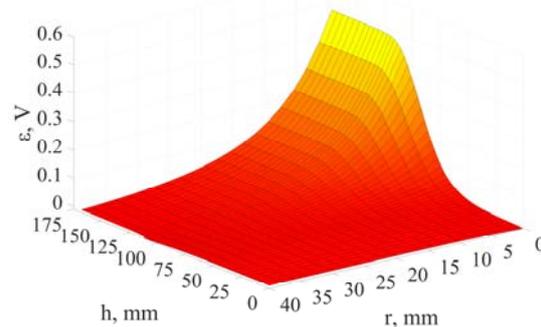


Рис. 9. Зависимость наводимой ЭДС от положения датчика уровня относительно металлического объёма

На рис. 9 представлена обобщенная зависимость  $\varepsilon(h, r)$ , построенная при максимальной используемой частоте переменного тока  $f = 500$  Гц. Для достижения точности определения границы проводящей среды в 95% необходимо обеспечение абсолютной ошибки позиционирования датчика не более 0.5 мм.

#### 5. Заключение

В ходе исследования были разработаны датчики измерения электропроводности и уровня цветных металлов, основывающиеся на однотипных схемах.

Установлено влияние погрешности позиционирования датчиков на точность измерений. Абсолютная погрешность позиционирования датчиков относительно анализируемых объёмов металла не должна превышать 1 мм.

Описанные в работе датчики могут найти своё применение в промышленности в качестве устройств для контроля проводимости металла, его чистоты, а также для регистрации положения верхней границы расплавленного металла во время различных технологических процессов.

Авторы благодарят за поддержку Фонд содействия инновациям (договоры № 14952ГУ/2019, код 0056785 и № 14835ГУ/2019, код 0056778, конкурс УМНИК 19 (б)) при выполнении работы.

### Список литературы

1. Krauter N., Eckert S., Gundrum T., Stefani F., Wondrak T., Frick P., Khalilov R., Teimurazov A. Inductive system for reliable magnesium level detection in a titanium reduction reactor // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2018. Vol. 49. N. 4. P. 2089–2096. DOI: 10.1007/s11663-018-1291-y
2. Teimurazov A. S., Frick P. G. Numerical study of molten magnesium convection in a titanium reduction apparatus // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57. N. 7. P. 1264–1275. DOI: 10.1134/S0021894416070129
3. Шерклиф Дж. А. Теория электромагнитного измерения расхода. М.: Мир, 1965. 268 с.
4. Субботин В. И., Кирилов П. Л., Козлов Ф. А. Очистка натрия от кислорода в натрии // *Теплофизика высоких температур*. 1965. Т. 3. № 1. С. 154–163.
5. Арнольд М. Н., Ивановский М. Н., Субботин В. И., Шматко Б. А. Влияние диссоциирующих и термически прочных газовых примесей на электросопротивление щелочных металлов // *Теплофизика высоких температур*. 1967. Т. 5. № 5. С. 812–816.

### References

1. Krauter N., Eckert S., Gundrum T., Stefani F., Wondrak T., Frick P., Khalilov R., Teimurazov A. Inductive system for reliable magnesium level detection in a titanium reduction reactor. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, vol. 49, no. 4, pp. 2089–2096. DOI: 10.1007/s11663-018-1291-y
2. Teimurazov A.S., Frick P. G. Numerical study of molten magnesium convection in a titanium reduction apparatus. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 7, pp. 1264–1275. DOI: 10.1134/S0021894416070129
3. Shercliff J. A. *The theory of electromagnetic flow measurements*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1962. 164 p.
4. Subbotin V.I., Kirilov P.L., Kozlov F.A. Purification of sodium from oxygen. Monitoring the oxygen content of sodium. *High Temperature*, 1965, vol. 3, no. 1, pp. 154–163 (In Russian).
5. Arnol'dov M. N., Ivanovskij M. N., Subbotin V. I., Shmatko B. A. Influence of dissociating and thermally stable gas impurities on the electrical resistance of alkali metals. *High Temperature*, 1967, vol. 5, no. 5, pp. 812–816 (In Russian).

### Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лосев Г. Л., Ельтищев В. А. Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020. № 4. С. 63–68. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-63-68

### Please cite this article in English as:

Losev G. L., Eltishchev V. A. Electromagnetic measurement of level and conductivity of non-ferrous metals. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 4, pp. 63–68. doi: 10.17072/1994-3598-2020-4-63-68