DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

УДК 621.3.08

МЕТОД ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ

И.Н.БАЖЕНОВ, О.О.БАСОВ
Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, Россия

В работе проанализированы особенности существующих методов и средств индукционного контроля магнитной восприимчивости среды. Сделан вывод о том, что указанные средства имеют общий недостаток, связанный с низкой точностью измерения, обусловленной волнообразной зависимостью чувствительности прибора от величины зазора между зондом и поверхностью исследуемой среды. Выявлены способы повышения чувствительности средств и точности измерения контролируемых параметров с помощью индуктивных измерительных преобразователей. Разработан метод индукционного резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде и проведена оценка его эффективности с помощью имитационного моделирования. Выработаны практические рекомендации для разработки приборов контроля качества магнетитовых руд. Предложен вариант структурной схемы прибора контроля качества магнетитовых руд.
***Ключевые слова*:** метод резонансного контроля магнитной восприимчивости руды, взаимная индуктивность, измерительный зонд

Как цитировать эту статью: Баженов И.Н. Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде / И.Н.Баженов, О.О.Басов // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 123-130. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

Введение. Основным показателем качества сырья для металлургических предприятий черной металлургии является содержание массовой доли железа в железорудном концентрате, стабильность которой существенно влияет на технико-экономические показатели работы доменных печей и стоимость чугуна. Согласно применяемой технологии обогащения на выходе каждого технологического процесса обогащения руды необходимо поддерживать определенную массовую долю железа [1, 6]. Известные технические средства, такие как рентгеновские и ультрафиолетовые анализаторы, достаточно сложны, дороги и не позволяют решать задачи комплексного текущего контроля процентного содержания железа в составе рудной массы или после каждой стадии обогащения руды на магнитообогатительной фабрике [13, 14].

Для неразрушающего контроля и оценки качества магнетитовых руд целесообразно использовать принцип измерения взаимной магнитной индукции между двумя катушками индуктивности, расположенными на фиксированном расстоянии в конструкции измерительного зонда. При этом чувствительность к контролируемому параметру качества руды зависит не только от расстояния между зондом и поверхностью рудосодержащей породы, но и от взаимного расположения данных катушек [2-4, 9].

Общий метод индукционного контроля процентного содержания железа в составе руды практически сводится к измерению амплитуды и фазы сигнала, передаваемого на приемную (измерительную) обмотку от генераторной катушки индуктивности, формирующей электромагнитное поле в килогерцовом диапазоне частот. В конструкции измерительного зонда эти катушки индуктивности размещают либо параллельно, либо перпендикулярно поверхности контролируемой руды, и по амплитуде и фазе сигнала на выходе измерительной катушки судят о процентном содержании железа в составе руды [16, 17, 22]. При таком косвенном методе измерения качества руды калибровка приборов контроля выполняется непосредственно на конкретных образцах рудной массы, отличающихся различным минералогическим составом.

Для контроля технологического процесса обогащения руды также используют сигналы магнитной индукции в рабочей зоне магнитного сепаратора [16, 17] либо выполняют оценку массовой доли железа в концентрате по сигналу нормальной составляющей вектора магнитной индукции [14]. В составе датчиков магнитного поля вместо измерительных катушек индуктивности иногда используются магниточувствительные резисторы, однако их применение не дает существенных преимуществ по чувствительности приборов контроля массовой доли

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

железа в концентрате. На точность измерения магнитных свойств руды влияет методическая погрешность, обусловленная волнообразной зависимостью чувствительности прибора от расстояния между зондом и поверхностью среды.

Одним из вариантов повышения точности измерения и чувствительности приборов контроля магнитной восприимчивости руды является увеличение приращения ЭДС ΔE на приемной катушке. Для реализации такого варианта предлагается использовать резонансный режим работы зонда. Для получения резонанса параллельно компенсационным и измерительной катушкам подключаются конденсаторы. При этом образуются колебательные контуры, частота резонанса которых должна задаваться равной частоте генератора: $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_n C_n}$, где L_n – индуктивность компенсационной или измерительной катушки; C_n – емкость конденсатора [10]. Сопротивление колебательных контуров на частоте резонанса в десятки раз превышает индуктивное сопротивление компенсационных и приемной катушек, что позволяет значительно повысить амплитуду сигналов на этих контурах при измерении магнитной восприимчивости среды.

Чувствительность любого устройства определяется по отношению приращения выходной величины U к измеряемому параметру χ, т.е. $S_\chi = \Delta U/\Delta\chi$. В нашем случае при постоянной амплитуде сигнала на генераторной обмотке выходным параметром является напряжение на измерительной катушке. При поднесении металлического листа на фиксированное расстояние (например, h = 10 см) приращение величины $\Delta\chi$ = const, поэтому по напряжению на измерительной катушке можно однозначно сравнивать чувствительность индукционных преобразователей как в резонансном режиме работы, так и без него.

Теоретические исследования чувствительности индукционных датчиков с различным взаимным расположением генераторной и приемной катушек индуктивности. При проведении исследований использовались катушки индуктивности с квадратной площадью поперечного сечения обмоток. Их выбор обусловлен простотой изготовления в условиях промышленного производства. Согласно рекомендациям [11], катушка индуктивности с квадратной площадью сечения обмоток обладает наибольшей индуктивностью L, если отношение среднего диаметра d обмотки к длине a катушки индуктивности $d \approx 3a$. При соосном размещении в зонде генераторной и приемной катушек индуктивности одинакового диаметра с одинаковым числом витков обмоток w на расстоянии y друг от друга (рис.1, *а*) их взаимная индуктивность определяется по формуле [11]

$$M = kL = \frac{\mu_0}{4\pi} 8{,}497 w^2 k d \,, \qquad (1)$$

где k – коэффициент магнитной связи катушек, зависящий от соотношения $y/a = (3y)/d$; L – индуктивность катушки, Гн; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; w – число витков обмотки; d – средний диаметр катушки, м.

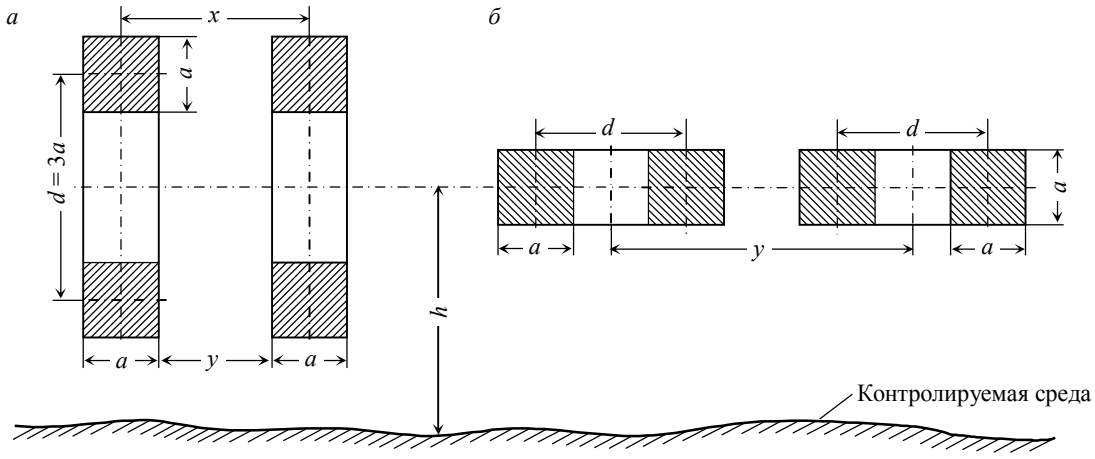


Рис.1. Расположение катушек индуктивности квадратного сечения: *а* – соосно друг другу; *б* – параллельно друг другу

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

Взаимная индуктивность катушек, удаленных на значительное расстояние друг от друга ($y > 2a$), определяется методом эквивалентных круговых контуров. При этом каждую катушку индуктивности заменяют одиночным контуром, имеющим диаметр

$$d_l = d(1 + a^2/6d^2) = d(1 + 1/54) = 1{,}01852d\,. \quad (2)$$

Взаимная индуктивность M_l двух таких контуров, расположенных соосно на расстоянии $x = y + a$ друг от друга, рассчитывается по формуле

$$M_1 = w^2 M_l\,. \quad (3)$$

Взаимная индуктивность M_l эквивалентных контуров, расположенных далеко друг от друга, определяется по формуле

$$M_l = \frac{\mu_0 \pi R}{16}\gamma^3\left(1 - \frac{3}{4}\gamma^2 + \frac{75}{128}\gamma^4 - \frac{245}{512}\gamma^6 + \frac{6615}{16384}\gamma^8 - \ldots\right), \quad (4)$$

где $R = d_l/2$ – радиус контура, м; $\gamma = 2R/x$ – параметр эквивалентного контура.

Аналогичная взаимная индуктивность катушек с прямоугольной площадью поперечного сечения обмоток с параллельными осями (рис. 1, *б*) вычисляется по формуле

$$M_2 = \frac{\pi}{32}\mu_0 w^2 \frac{d^4}{a^4}\left(\frac{Z_1}{b_1} - \frac{Z_2}{y}\right), \quad (5)$$

где d и a – соответственно средний диаметр и длина катушек; $b_1 = \sqrt{a^2 + y^2}$; y – расстояние между осями катушек, м; $Z_1 = \rho_2^2 - \frac{1}{2}\alpha_1^2\rho_2\rho_4 P_2(\gamma_1) + \frac{1}{8}\alpha_1^4(2\rho_6\rho_2 + 3\rho_4^2)P_4(\gamma_1) - \frac{5}{32}\alpha_1^6(\rho_8\rho_2 + 6\rho_6\rho_4)P_6(\gamma_1) + \ldots$ – расчетный параметр; $\rho_n = 1 + \frac{n(n-1)}{3!}\rho^2 + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{5!}\rho^4 + \ldots + \frac{n(n-1)(n-2)\ldots 2\cdot 1}{(n+1)!}\rho^n$;

$\alpha_1 = d/2b_1$; $P_n(\gamma) = \frac{1}{2^n(n)!}\frac{\partial^n}{\partial\gamma^n}(\gamma^2 - 1)^n$ – сферические функции Лежандра *n*-го порядка [15]; n – целое число; $\gamma_1 = a/b_1$; параметр Z_2 аналогичен Z_1 при замене γ_1 на $\gamma_2 = 0$ и при замене α_1 на $\alpha_2 = d/(2b_2) = d/(2y)$.

В ходе исследований с использованием программы Mathcad проведен расчет взаимной индуктивности двух катушек, имеющих одинаковое число витков $w_1 = 1000$, $w_2 = 2000$ и $w_3 = 3000$ и различные геометрические размеры: $a_1 = 0{,}005$ м, $a_2 = 0{,}01$ м, $a_3 = 0{,}02$ м, при изменении расстояния между ними $y = 0{,}05$; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 м.

В результате получены расчетные зависимости взаимной индуктивности катушек от расстояния при соосном и параллельном размещении относительно друг друга, согласно которым шестикратное увеличение расстояния между генераторной и измерительной катушками приводит к экспоненциальному понижению взаимной индуктивности между ними примерно на два десятичных порядка (рис.2).

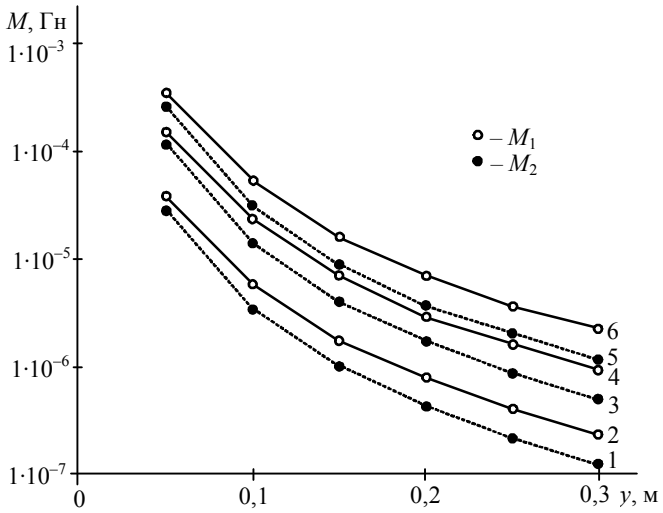


Рис.2. Расчетные зависимости взаимной индуктивности катушек от расстояния при их соосном и параллельном размещении относительно друг друга (a = 0,005 м)

1, 2 – w_1 = 1000; 3, 4 – w_2 = 2000; 5, 6 – w_3 = 3000

Установлено, что параллельное размещение катушек индуктивности в конструкции зонда приводит к уменьшению

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

взаимной индуктивности примерно в два раза по сравнению с соосными катушками, причем на различном расстоянии между ними. Кроме того, увеличение количества витков в генераторной и измерительной катушках в диапазоне от $w_1 = 1000$ до $w_3 = 3000$ позволяет примерно в 10 раз повысить абсолютные значения взаимной индуктивности при различном размещении катушек.

На основании проведенных расчетов также установлено, что увеличение размера обмоток от $a_1 = 0{,}005$ м до $a_3 = 0{,}02$ м приводит к возрастанию примерно в 40 раз взаимной индуктивности катушек при сохранении экспоненциальной зависимости ее спада при увеличении расстояния y между катушками.

Анализ полученных зависимостей взаимной индуктивности от расстояния между катушками показал, что электромагнитное поле, создаваемое генераторной катушкой при соосном расположении, оказывает большее побочное (мешающее) влияние на приемную катушку при измерении магнитной восприимчивости. Геометрические размеры и количество витков катушек влияют на абсолютные значения взаимной индуктивности, при этом форма зависимости остается экспоненциальной. С учетом полученных данных для выбора конструкции измерительного зонда и оценки его чувствительности к контролируемой магнитной среде необходим натурный эксперимент с металлической пластиной.

Результаты натурного эксперимента по оценке чувствительности измерительного зонда к контролируемой магнитной среде. Схема проведения эксперимента представлена на рис.3. При одинаковом числе витков $w = 1000$ в генераторной и приемной катушках параллельно приемной катушке через ключ S подключался конденсатор с емкостью $C = 0{,}5$ мкФ для получения параллельного колебательного контура с резонансной частотой $f_r = 1140$ Гц.

При проведении исследований генераторная и приемная катушки располагались на разном расстоянии друг от друга. На генераторную катушку подавалось синусоидальное напряжение $U_g = 10$ В с частотой $f_r = 1140$ Гц. Цифровым вольтметром измерялось напряжение на приемной катушке индуктивности в трех случаях: без ферромагнитного сердечника, с введением ферромагнитного сердечника диаметром 1 см в приемную катушку и при подключении резонансного конденсатора C к приемной катушке с ферромагнитным сердечником. Магнитной средой служила металлическая пластина размером $0{,}05 \times 1{,}0$ м, кажущуюся магнитную восприимчивость которой можно принять $\chi_{max} = 2$ СИ, которая размещалась на расстоянии 0,1 м от генераторной и приемной катушек. При этом расстояние между катушками изменялось от 5 до 30 см.

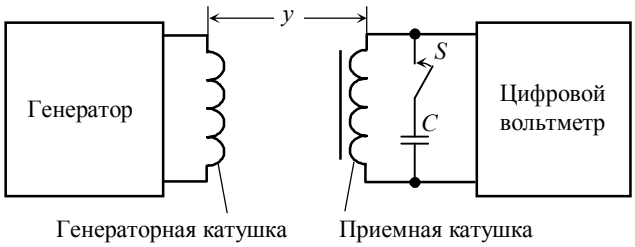


Рис.3. Схема проведения эксперимента

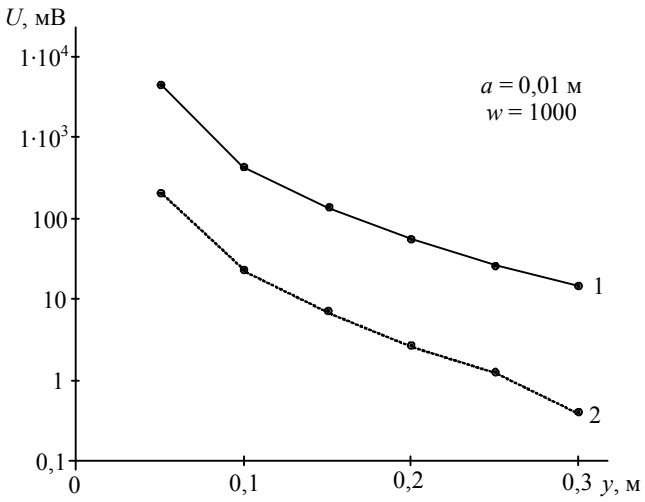


Рис.4. Зависимость напряжения на приемной катушке индуктивности в резонансном U_{rez} (1) и без резонансного U_{nrez} (2) режима от расстояния до генераторной катушки

В результате воздействия электромагнитного поля на зажимах приемной катушки индуктивности возникает напряжение (в вольтах) взаимоиндукции $U_{pr} = MI_g$, где I_g – ток, протекающий по генераторной катушке, А; M – взаимная индуктивность, Гн [18].

На рис.4 показаны зависимости напряжения на приемной катушке индуктивности от расстояния до генераторной катушки в резонансном U_{rez} и без резонансного U_{nrez} режима работы.

Для оценки чувствительности зонда при различном расположении катушек относительно друг друга были получены зависимости

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.123*

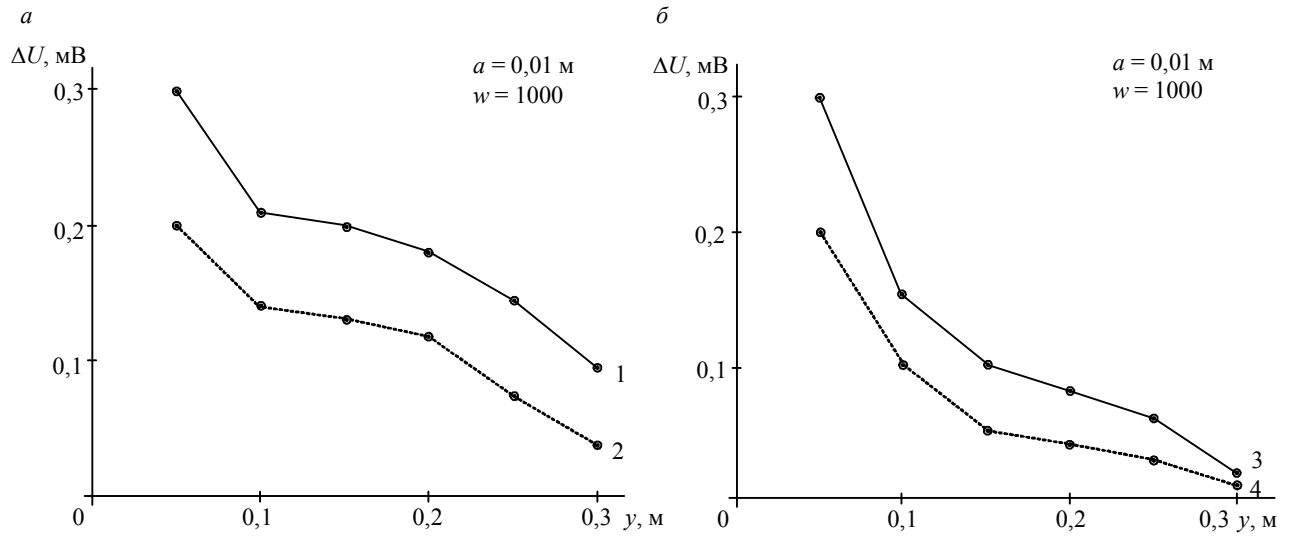


Рис.5. Зависимости приращения напряжения на приемной катушке при соосном и параллельном расположении от расстояния до генераторной катушки при наличии и отсутствии металлической пластины:
а – в резонансном режиме работы (1 – ΔU_{1v}; 2 – ΔU_{1g}); *б* – в отсутствии резонанса (3 – ΔU_{2v}; 4 – ΔU_{2g})

приращения напряжения на приемной катушке при их соосном ΔU_{1g}, (ΔU_{2g}) и параллельном ΔU_{1v} (ΔU_{2v}) расположении от расстояния y до генераторной катушки при наличии металлической пластины и при отсутствии (рис.5).

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

1) в известной схеме измерительного зонда, содержащего генераторную и приемную катушки без сердечников при расположении катушек зонда, например, соосно, напряжение на приемной катушке изменяется в диапазоне $\Delta U_{nrez} = 0{,}41 \div 197$ мВ при увеличении расстояния y между катушками от 5 до 30 см;

2) при подключении емкости напряжение на приемной катушке, работающей в резонансном режиме, повышается примерно в 30 раз, и при аналогичном изменении расстояния y между катушками изменяется в диапазоне $\Delta U_{rez} = 14{,}7 \div 4302$ мВ;

3) сравнение приращений напряжений на приемной катушке при различном взаимном размещении генераторной и приемной катушек показало, что применение параллельного расположения катушек позволяет примерно в 1,5 раза увеличить чувствительность зонда к содержанию железа (рис.4, *б*);

4) относительная чувствительность к содержанию железа не зависит от режима работы приемной катушки и изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния h от катушек до поверхности листа, однако применение резонансного режима работы позволяет увеличить абсолютные значения чувствительности примерно в $\Delta U_{1v}/\Delta U_{2v} = 10$ раз (рис.5);

5) амплитуда напряжения на приемной катушке пропорциональна взаимной индукции с генераторной катушкой и уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния между этими катушками, что соответствует расчетным графикам (см. рис.2). Вследствие этого на расстоянии между катушками $y = 0{,}3$ м напряжение на приемной катушке уменьшается до сотен-десятков микровольт, что приводит к нестабильности результатов контроля содержания железа в рудной массе из-за влияния помех от электрооборудования при работе прибора контроля в условиях производства.

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет выработать практические рекомендации для разработки приборов контроля качества магнетитовых руд:

1) генераторную и измерительную катушки следует размещать параллельно друг другу и перпендикулярно к контролируемой поверхности руды, что позволяет примерно в 1,5 раза повысить чувствительность прибора контроля к содержанию металла в рудной массе;

2) амплитуду сигнала на приемной катушке можно повысить посредством введения ферромагнитного сердечника. При этом генераторная катушка должна быть без сердечника, так как

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.123*

напряженность формируемого магнитного поля $H = I_g w$ зависит только от числа витков w и переменного тока I_g [12], и при постоянной амплитуде напряжения на выходе генератора ток намагничивания уменьшается за счет увеличения индуктивного сопротивления обмотки из-за введения сердечника;

3) для повышения амплитуды сигнала на приемной катушке следует использовать резонансный режим работы, применение которого позволяет, во-первых, повысить уровень измеряемого напряжения и, во-вторых, ослабить относительное влияние промышленных помех на результат контроля.

Кроме этого, для повышения помехоустойчивости при большом расстоянии между генераторной и приемной катушками целесообразно измерять напряжение на приемной катушке методом весовых функций [7, 8], позволяющим примерно на 60 дБ (или в 1000 раз) снизить влияние сетевой помехи с частотой 50 ± 1 Гц на результат контроля.

Практическая реализация метода индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде. Вариант схемной реализации метода индукционного контроля массовой доли железа в руде представлен на рис.6 [5]. Для получения резонанса параллельно компенсационным (с индуктивностью L_1 и L_2 соответственно) и измерительной (с индуктивностью L_3) катушкам подключаются три конденсатора (с емкостями C_1, C_2 и C_3 соответственно). Сопротивление образованных колебательных контуров на частоте резонанса в десятки раз превышает индуктивное сопротивление компенсационных и приемной катушек, что позволяет значительно повысить амплитуду сигналов на этих контурах при изменении магнитной восприимчивости среды.

Устройство контроля (рис.6) работает следующим образом. При протекании переменного тока от генератора синусоидального напряжения по виткам генераторной катушки в окружающем пространстве создается переменное электромагнитное поле. Конструктивно приемная катушка устанавливается в зонде на фиксированном расстоянии l_{gp} от генераторной катушки. Первая компенсационная катушка размещается на расстоянии $0{,}2l_{gp}$, а вторая компенсационная катушка – на расстоянии $0{,}8l_{gp}$ от генераторной катушки. В воздухе при отсутствии магнитной среды это электромагнитное поле индуцирует на двух встречно включенных компенсационных катушках, равных по амплитуде и противоположных по фазе ЭДС, E_1 и E_2.

При размещении зонда над исследуемой средой происходит ее намагничивание переменным электромагнитным полем генераторной катушки. Появляющееся при этом вторичное магнитное поле индуцирует в приемной и в компенсационных катушках разные по амплитуде ЭДС. В результате этого на входе первого усилителя появляется разностная ЭДС ΔE_1 выходных сигналов приемной и первой компенсационной катушек, а на входе второго усилителя – разностная ЭДС ΔE_2 выходных сигналов приемной и второй компенсационной катушек. После усиления разностных ЭДС ΔE_1 и ΔE_2 усилителями и их выпрямления синхронными детекторами постоянные или медленно меняющиеся сигналы усиливаются усилителями постоянного тока и поступают на

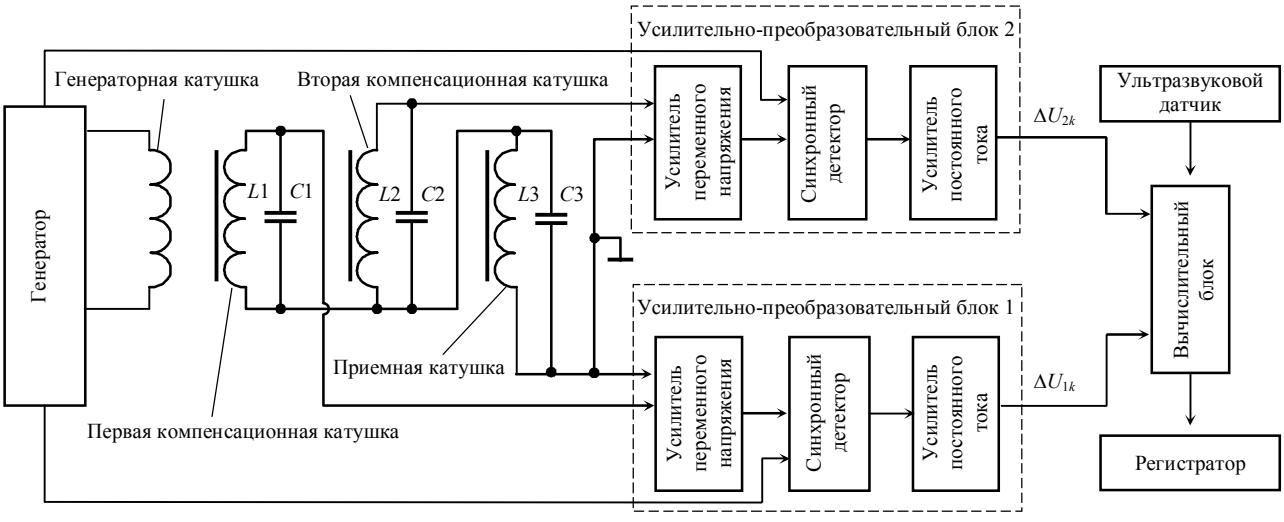


Рис.6. Вариант схемной реализации метода индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

DOI: 10.25515/PMI.2018.2.123

первые два входа вычислительного блока на основе микроконтроллера, содержащего коммутатор входных сигналов и аналого-цифровой преобразователь для получения и обработки результатов контроля в цифровой форме. На третий вход вычислительного блока поступают импульсы от ультразвукового датчика, определяющего расстояние h от зонда до исследуемой среды для коррекции результатов преобразования, которые выводятся на регистратор. По величине фиксируемого в цифровой форме результата определяется магнитная восприимчивость среды.

При размещении зонда над плоской поверхностью исследуемой среды разностные ЭДС $\Delta E_1 = E_0 G_1 \chi$ и $\Delta E_2 = E_0 G_2 \chi$ зависят от произведения наводимой в воздухе ЭДС E_0, геометрических факторов зонда G_1, G_2 и магнитной восприимчивости среды $\chi = I/H$, пропорциональной ее намагниченности I от напряженности H электромагнитного поля. Значения геометрических факторов зонда G_1, G_2 зависят от расположения компенсационных катушек относительно генераторной катушки и изменяются в широком диапазоне в зависимости от отношения расстояния до исследуемой среды и длины зонда h/l_{gp}.

Разностные ЭДС ΔE_1, ΔE_2 усиливаются и детектируются усилительно-преобразовательными блоками с коэффициентами преобразования K_1, K_2, поэтому напряжения на двух входах вычислительного блока составляют

$$\Delta U_{1k} = K_1 E_0 G_1 \chi , \quad (6)$$

$$\Delta U_{2k} = K_2 E_0 G_2 \chi . \quad (7)$$

Для получения одинаковых максимальных значений измеряемых напряжений $\Delta U_{1\max}$ и $\Delta U_{2\max}$ необходимо выполнение условия $K_1 G_{1\max} = K_2 G_{2\max}$, которое при использовании усилительно-преобразовательных блоков с равными коэффициентами преобразования $K_1 = K_2$ сводится к обеспечению одинаковых максимальных значений геометрических факторов зонда $G_{1\max} = G_{2\max}$. Выполнение такого равенства можно обеспечить уменьшением в 4 раза количества витков в первой компенсационной катушке по сравнению с числом витков во второй компенсационной катушке (при условии их размещения на расстояниях $0{,}2l_{gp}$ и $0{,}8l_{gp}$ от генераторной катушки).

Использование ультразвукового датчика позволяет создать резонансный метод контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантный к геометрическому фактору. Ультразвуковой датчик определяет h расстояние от зонда до исследуемой среды и подает импульсы разной длительности на третий вход вычислительного блока, который автоматически изменяет коэффициент преобразования сигналов ΔU_{1k} и ΔU_{2k}, поступающих от усилителей постоянного тока, выполняет их сравнение и выделяет наибольший из них, по величине которого вычисляется магнитная восприимчивость исследуемой среды для ее вывода на регистратор.

Увеличение амплитуды сигналов на двух компенсационных и приемном контурах позволяет использовать усилители переменного напряжения с небольшими коэффициентами усиления и формировать на входах синхронных детекторов напряжения в единицы вольт. Этим уменьшается влияние инструментальных погрешностей синхронных детекторов и температурного дрейфа усилителей постоянного тока на точность преобразования.

Практически за счет повышения амплитуды сигналов на выходах компенсационных и приемного колебательных контуров дополнительно ослабляется относительное влияние внешних наводок и помех и уменьшается случайная погрешность преобразования.

Для оценки эффективности предложенного технического решения было проведено моделирование устройства на ПЭВМ в программе Electronics Workbench Pro, в результате которого установлено следующее:

1) при подаче на генераторную катушку синусоидального напряжения с амплитудой $U = 10$ В и частотой $f = 1$ кГц изменение индуктивности одной из компенсационных катушек на 10 % относительно начального значения $L = 0{,}1$ Гн приводит к появлению разностного напряжения $\Delta U \approx 2{,}28$ мВ;

2) при подключении конденсаторов с одинаковой емкостью $C = 200$ нФ параллельно компенсационным катушкам изменение индуктивности одной из них на ±10 % изменяет разностное

DOI: *10.25515/PMI.2018.2.123*

напряжение на $\Delta U_r \approx 80$ мВ на частоте резонанса контуров $f_r = 1$ кГц при входных сопротивлениях усилителей переменного напряжения, составляющих 10 кОм, т.е. амплитуда измеряемого сигнала увеличивается примерно в $K = \Delta U_r / \Delta U = 80{,}2/2{,}28 \approx 35$ раз.

Заключение. В работе рассмотрен метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, представлено его теоретическое обоснование и экспериментально доказана эффективность его применения в приборах контроля качества магнетитовых руд.

Установлено, что применение резонансного режима работы приемного и компенсационных контуров позволяет практически в десятки раз повысить чувствительность прибора контроля к изменению электромагнитного поля и дает возможность увеличить более чем в 30 раз чувствительность устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арутюнян А.С.* Контроль качества геофизических исследований скважин / А.С.Арутюнян, Е.О.Петрушин, Шьяка Хаким // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2016. № 4. С. 38-59.

2. *Аузин А.А.* Повышение точности опробования магнетитовых руд в их естественном залегании // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2014. № 1. С. 91-94.

3. *Аузин А.А.* О возможности оптимизации комплексов геофизических исследований в скважинах при поисках месторождений рудных полезных ископаемых / А.А.Аузин, О.М.Муравина // Там же. 2013. № 1. С. 184-188.

4. *Аузин А.А.* Геофизические исследования в скважинах при поисках и разведке месторождений рудных полезных ископаемых на Воронежской антеклизе // Там же. 2013. № 1. С. 175-183.

5. *Баженов И.Н.* Средства контроля магнетитовых руд методом оценки магнитной восприимчивости / И.Н.Баженов, К.В.Подмастерьев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. Вып. 2 (316). С. 145-151.

6. *Богуславский Э.И.* Управление качеством руды – основа горно-технологического менеджмента // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 26-28.

7. *Гутников В.С.* Фильтрация измерительных сигналов. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 192 с.

8. *Гутников В.С.* Методы реализации специальных весовых функций в измерительных устройствах // Измерения, контроль, автоматизация. 1983. Вып. 2. С. 3-15.

9. *Запорожец В.М.* Геофизические методы исследования скважин: Справочник геофизика. М.: Недра, 1983. 591 с.

10. *Изюмов Н.М.* Основы радиотехники / Н.М.Изюмов, Д.П.Линде. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

11. *Калантаров П.Л.* Расчет индуктивностей: Справочное пособие / П.Л.Калантаров, Л.А.Цейтлин. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

12. *Калашников С.Г.* Электричество. М.: Физматлит, 2003. 624 с.

13. *Кочура Е.В.* Система автоматического контроля и регулирования качества концентрата на выходе секции обогащения магнетитовых руд / Е.В.Кочура, Бостанжи Ислам Абдельхамид Юсеф Аль // Обогащение полезных ископаемых. 2005. Вып. 24 (65). С. 100-105.

14. *Кочура Е.В.* Метод автоматического контроля массовой доли железа в концентрате магнитного сепаратора / Е.В.Кочура, Бостанжи Ислам Абдельхамид Юсеф Аль // Науковий вісник НГУ. 2005. Вып. 10. С. 86-89.

15. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика: В 10 т. Том III. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. М.: Наука, 1989. 768 с.

16. Патент 375341 СССР. Способ автоматического контроля содержания магнитных фракций в продуктах обогащения магнитного сепаратора / Е.В.Кочура. Опубл. 23.02.88. Бюл. № 7.

17. Патент 1708423 СССР. Способ автоматического контроля процесса магнитной сепарации / Е.В.Кочура. Опубл. 11.04.89. Бюл. № 4.

18. *Попов В.П.* Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1998. 575 с.

19. *Ратушняк А.Н.* Индукционный каротаж скважин в процессе бурения / А.Н.Ратушняк, С.В.Байдиков, В.К.Теплухин // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 3. С. 93-102.

20. *Ратушняк А.Н.* Теоретические и экспериментальные основы индукционных методов исследований скважин / А.Н.Ратушняк, В.К.Теплухин / Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича УрО РАН. Екатеринбург, 2017. 127 с.

21. *Ратушняк А.Н.* Индукционный каротаж в обсаженных скважинах / А.Н.Ратушняк, С.В.Байдиков, В.К.Теплухин // Уральский геофизический вестник. Екатеринбург, 2016. № 2 (28). С. 98-107.

22. Электромагнитная система для непрерывного индуктивного профилирования / Е.В.Арзамасцев, Д.В.Исламгалиев, А.Д.Коноплин, А.Н.Ратушняк // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 91-97.

Авторы: **И.Н. Баженов,** *сотрудник, bazhen-orel77@mail.ru* (*Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, Россия*); **О.О. Басов,** *доктор техн. наук, сотрудник, oobasov@mail.ru* (*Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, Россия*).

Статья принята к публикации 04.04.2017.