

УДК 621.3.08

## АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗОНАНСНОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ

И.Н. Баженов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация

Адрес для переписки: [bazhen-orel77@mail.ru](mailto:bazhen-orel77@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.04.17, принята к печати 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-400-408

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Баженов И.Н. Алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 400–408. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-400-408

### Аннотация

Рассмотрены 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. Выявлены способы повышения их чувствительности и точности измерения контролируемых параметров с помощью индуктивных измерительных преобразователей. Разработан алгоритм реализации резонансного контроля магнитной восприимчивости. Особенностью алгоритма является использование в расчетах конкретного значения расстояния от измерительного зонда до контролируемой среды, полученное с помощью ультразвукового датчика расстояния, для ослабления влияния неровностей рудосодержащей породы на точность измерения ее магнитных свойств. Для определения коэффициентов масштабирования разработан алгоритм калибровки прибора. Показано, что применение предложенного алгоритма позволяет повысить чувствительность средств оперативного контроля магнетитовых руд за счет автоматической обработки сигналов и обеспечить погрешность измерения менее 1,5% в расширенном диапазоне расстояний от зонда до исследуемой среды, который примерно в 10 раз превышает диапазон измерения аналогичных устройств.

### Ключевые слова

метод резонансного контроля, магнитная восприимчивость руды, измерительный зонд

## ALGORITHM FOR RESONANCE CONTROL OF IRON MASS FRACTION IN MAGNETITE ORE

I.N. Bazhenov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Academy of Federal Agency of Protection of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation

Corresponding author: [bazhen-orel77@mail.ru](mailto:bazhen-orel77@mail.ru)

### Article info

Received 01.04.17, accepted 30.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-400-408

Article in Russian

**For citation:** Bazhenov I.N. Algorithm for resonance control of iron mass fraction in magnetite ore. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 400–408 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-400-408

### Abstract

The paper deals with the features of induction control existing methods and facilities for the magnetic susceptibility of the medium. We draw conclusion that these facilities have a common disadvantage associated with low measurement accuracy. The ways to improve their sensitivity and measuring accuracy of the controlled parameters through inductive measuring transducers are revealed. Algorithm of the resonance control implementation for the magnetic susceptibility is developed. Its characteristic feature is the usage of specific distance value from the measuring probe to the controlled medium in the calculations, obtained by an ultrasonic distance sensor in order to reduce the influence of unevenness of the ore-bearing rock on the measuring accuracy of its magnetic properties. For the determination of the scaling factors, an appropriate calibration algorithm has been developed. It is shown that the application of the proposed algorithm makes it possible to increase the sensitivity of the facilities for the magnetite ores operative control by automatic signal processing and to provide a measurement error less than 1.5% in the extended range of distances from the probe to the medium in question, which is approximately 10 times larger than the measuring range of similar devices.

### Keywords

resonance control method, magnetic susceptibility, measuring probe

## Введение

Контроль относительного содержания железа в рудной массе необходим как при оценке качества руды в природных условиях, так и при технологическом процессе ее обогащения на горнодобывающих предприятиях. Как правило, такой контроль основан на индукционном методе измерения магнитной восприимчивости рудосодержащей массы, реализуемом посредством ее намагничивания низкочастотным электромагнитным полем [1–3], формируемым генераторной катушкой индуктивности, и измерении амплитудно-фазовых параметров напряжения на приемной катушке. Намагничивание контролируемой рудной массы переменным током позволяет исключить влияние постоянного геомагнитного поля на результаты измерения, однако точность контроля зависит от изменения расстояния до поверхности руды, а также от инструментальной погрешности измерения напряжения малого уровня, получаемого на измерительной катушке, и дисперсии магнитных свойств, обусловленных наличием ферромагнитных минералов [4, 5].

Существующий метод контроля массовой доли железа в магнетитовой руде основан на возбуждении электромагнитного поля в объеме исследуемой среды и измерении относительного изменения магнитной составляющей напряженности этого поля в зависимости от изменения магнитных свойств контролируемого пространства (рис. 1).

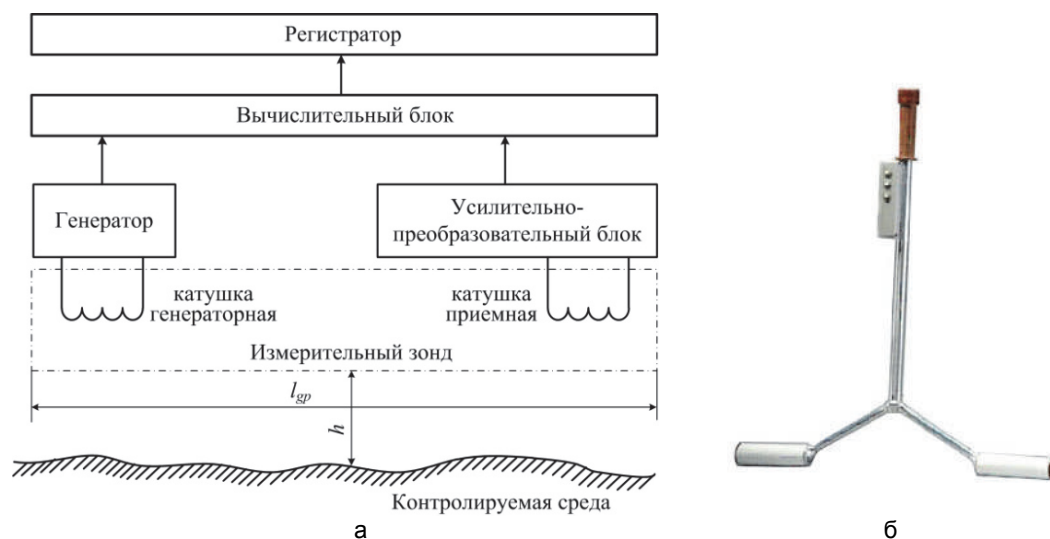


Рис. 1. Вариант схемной реализации существующего метода контроля массовой доли железа в магнетитовой руде: упрощенная структурная схема устройства (а); измерительный зонд прибора магнитного опробования МКС-4В<sup>1</sup> (б)

Возбуждение электромагнитного поля и измерение его напряженности производится с помощью измерительного зонда, генераторная катушка которого подключена к генератору низкочастотного напряжения, а приемная катушка – к вторичному электронному преобразователю. Витки приемной катушки пронизываются магнитными потоками первичного поля  $\Phi_0$  и вторичного поля  $\Phi'$ . Суммарный магнитный поток  $\Phi = \Phi_0 + \Phi'$  индуцирует в приемной катушке ЭДС  $E$ :

$$E = E_0 + \Delta E,$$

где  $E_0$  – первичная ЭДС источника;  $\Delta E$  – вторичная ЭДС, обусловленная контролируемой средой.

На практике первичная ЭДС измеряется в удалении от исследуемой магнитной среды (в воздухе), а вторичная – как приращение полной ЭДС  $\Delta E = E - E_0$  в присутствии этой среды [6, 7]. Значение ЭДС  $E$  в приемной катушке максимально при расположении измерительного зонда в немагнитной среде (в воздухе), а в магнитной среде ЭДС уменьшается с увеличением магнитной восприимчивости руды.

Для интерпретации имеет значение относительное приращение ЭДС  $\Delta E/E_0$ , которое не зависит от интенсивности первичного поля, а является функцией магнитной восприимчивости среды, параметров измерительного зонда и геометрических условий измерения  $\Delta E/E_0 = f(\chi, G)$ . При измерении однородной среды можно получить линейную зависимость вторичной ЭДС от магнитной восприимчивости среды [8]:

$$\Delta E/E_0 = G\chi,$$

<sup>1</sup> Измерительный зонд прибора магнитного опробования МКС-4В [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://uralrudoavtomatika.ru/p=35>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.04.2017).

где  $G$  – геометрический фактор;  $\chi$  – магнитная восприимчивость среды. Безразмерный коэффициент пропорциональности  $G$  между отношением  $\Delta E/E_0$  и величиной  $\chi$  зависит, прежде всего, от геометрических условий измерения: формы поверхности рудной массы, геометрических параметров зонда и его ориентировки относительно этой поверхности [9].

В природных условиях к сильномагнитным средам относятся главным образом железные руды преимущественно магнетитового состава. Трудности интерпретации в этом случае возникают из-за существенно нелинейной зависимости  $\Delta E$  от  $\chi$  [10, 11].

На точность измерения магнитных свойств магнетитовой руды влияет методическая погрешность, обусловленная волнообразной зависимостью чувствительности прибора от расстояния между зондом и поверхностью исследуемой среды [12], а также нестабильность результатов контроля содержания железа в рудной массе из-за влияния помех от электрооборудования при работе прибора контроля в условиях производства [13]. В этой связи необходимо разработать алгоритмическое обеспечение, которое позволит, во-первых, ослабить или скомпенсировать влияние расстояния до рудной массы на результаты контроля ее качества и, во-вторых, повысить амплитуду сигнала на измерительной катушке для снижения инструментальной погрешности ее измерения.

### Анализ погрешностей существующих средств измерения массовой доли железа в магнетитовой руде

Известны технические средства измерения магнитной восприимчивости, такие как измеритель магнитной восприимчивости полевой ПИМВ-М<sup>1</sup>, рудничный измеритель магнитной восприимчивости РИМВ-3<sup>2</sup> и прибор магнитного опробования МКС-4В<sup>3</sup>.

В соответствии с алгоритмом работы указанных средств измерение магнитной восприимчивости осуществляется индуктивным методом с помощью ручного зонда. Процесс контроля магнитной восприимчивости осуществляется в следующей последовательности<sup>4</sup>.

1. Измерение напряжения на измерительной катушке индукционного преобразователя «в воздухе» –  $U_0$  (при удалении от исследуемого образца или горной породы).
2. Измерение напряжения на измерительной катушке индукционного преобразователя в присутствии магнитной среды –  $U$ .
3. Расчет приращения напряжения на измерительной катушке –  $\Delta U = U_0 - U$ .
4. Расчет параметра  $K = \Delta U/U_0$ . Параметр  $K$  нелинейно зависит от содержания железа в исследуемой среде и пропорционален кажущейся магнитной восприимчивости  $\chi'$ .
5. Окончательный расчет кажущейся магнитной восприимчивости  $\chi'$  с учетом поправочных коэффициентов, указанных в руководстве по эксплуатации.

Приборы калибруют для идеализированных условий, когда измерительная катушка контактирует с абсолютно гладкой плоскостью, ограничивающей полупространство, представленное однородной изотропной магнитной средой с кажущейся магнитной восприимчивостью  $\chi' = 2$ .

В процессе измерения неровной поверхности неизбежно возникает субъективная погрешность, обусловленная неправильным размещением зонда, при этом показания устройства могут оказаться заведомо неверными.

В связи с этим рассмотренные средства измерения имеют общий недостаток, связанный с низкой точностью измерения, причем погрешность измерения параметра  $K$  согласно руководству пользователя составляет 3–10%.

Погрешность измерения обусловлена зависимостью чувствительности устройства от расстояния между зондом и исследуемой средой. Разностная ЭДС  $\Delta E$  для двухкатушечного зонда (рис. 1) при фиксированном расстоянии между генераторной и приемной катушками, например,  $l_{gp} = 30$  см, достигает максимума на оптимальном расстоянии от поверхности исследуемой среды  $h_{opt} = 0,6 \cdot l_{gp} = 18$  см. Если брать приемлемую погрешность вследствие влияния высоты  $h$  и неровностей поверхности в 10%, то

<sup>1</sup> Руководство по эксплуатации ТТ 2.899.000 РЭ. Измеритель магнитной восприимчивости полевой ПИМВ-М // Министерство природных ресурсов РФ. ФГУНПП «Геологоразведка». 2007. 19 с.

<sup>2</sup> Руководство по эксплуатации ТУ 1.530.054. Рудничный измеритель магнитной восприимчивости РИМВ-3 // ФГУНПП «Геологоразведка». 1992. 8 с.

<sup>3</sup> Руководство по эксплуатации ТУ 4314-003-93630001-2007. Прибор магнитного опробования МКС-4В // ООО «Уралрудоавтоматика». Сертификат соответствия №РОСС RU.ПВ11.Н00201 ФГУ «Уральский центр стандартизации, метрологии и сертификации». 2007. 5 с.

<sup>4</sup> Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / Под ред. Е.П. Лемана, А.П. Савицкого. СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. 414 с.

допустимый диапазон изменения высоты размещения измерительного зонда при номинальном значении геометрического фактора простирается от  $h_1 = 0,51 \cdot l_{gp} = 15$  см до  $h_2 = 0,76 \cdot l_{gp} = 22$  см и составляет 7 см [12].

### Алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

Повышение точности измерения магнитной восприимчивости возможно за счет увеличения отношения  $\Delta E/E_0$  [14]. Для увеличения значений вторичной ЭДС и ослабления влияния неровностей рудосодержащей породы на точность измерения ее магнитных свойств предлагается использовать метод резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде (рис. 2) [15].

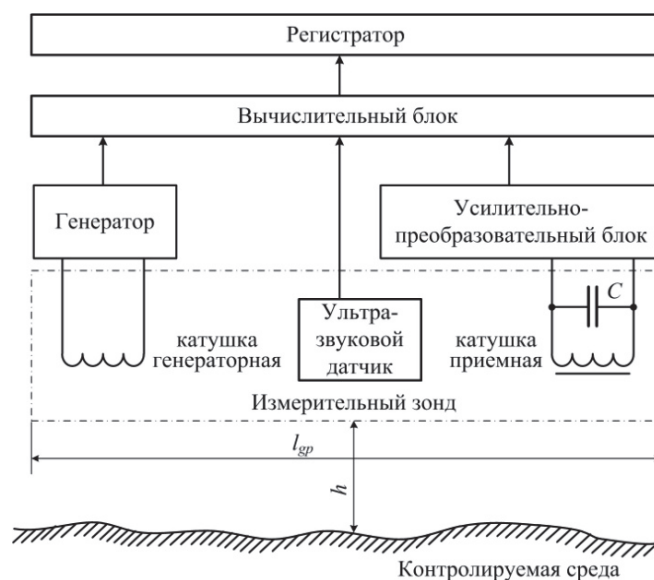


Рис. 2. Вариант схемной реализации метода резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

Такой метод контроля реализуется сравнительно просто: в приемную катушку вводится ферромагнитный сердечник с высокой относительной магнитной проницаемостью  $\mu \geq 1000$ ; к этой катушке с индуктивностью  $L$  подключается конденсатор  $C$ , образующий вместе с ней параллельный контур, частота резонанса которого устанавливается равной частоте электромагнитного поля генераторной катушки. Сопротивление колебательных контуров на частоте резонанса в десятки раз превышает индуктивное сопротивление приемной катушки [16]. Такое сравнительно простое решение позволяет в десятки раз повысить амплитуду сигнала на приемной катушке и, соответственно, уменьшить относительную погрешность измерения.

Алгоритм реализации резонансного контроля представлен на рис. 3.

Для ослабления влияния неровностей рудосодержащей породы на точность измерения ее магнитных свойств предлагается использовать в расчетах конкретное значение  $h_i$  от зонда до контролируемой среды, полученное с помощью ультразвукового датчика расстояния.

В соответствии с алгоритмом (рис. 3) контроль массовой доли железа в магнетитовой руде осуществляется в следующей последовательности.

1. Измерение напряжения в воздушной среде  $U_0$  в отсутствие исследуемой среды.
2. Аналого-цифровое преобразование измеренного значения  $U_0$  и формирование соответствующего кода  $N_0$ .
3. Размещение зонда над рудосодержащей породой и измерение расстояния  $h_i$  между зондом и контролируемой средой.
4. Сравнение полученного значения  $h_i$  с допустимым, определенном на режиме калибровки.
5. Измерение напряжений  $\Delta U_{1k}$  и  $\Delta U_{2k}$  на конкретном расстоянии от исследуемой среды  $h_i$ , их аналого-цифровое преобразование и формирование соответствующих кодов  $\Delta N_1(\Delta U_{1k})$  и  $\Delta N_2(\Delta U_{2k})$ .
6. Выбор максимального значения кода  $N_{\max} = \max(\Delta N_1, \Delta N_2)$ .

7. Вычисление кодового значения напряжения  $\Delta N = k_i \cdot \Delta N_{\max}$  с учетом масштабирующего коэффициента  $k_i$ , определяемого в процессе калибровки.
8. Вычисление магнитной восприимчивости исследуемой среды  $\chi' = \Delta N / N_0$ .
9. Отображение рассчитанного значения  $\chi'$  магнитной восприимчивости.

Коэффициенты масштабирования формируются при калибровке прибора в соответствии с алгоритмом резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде в режиме калибровки (рис. 4).

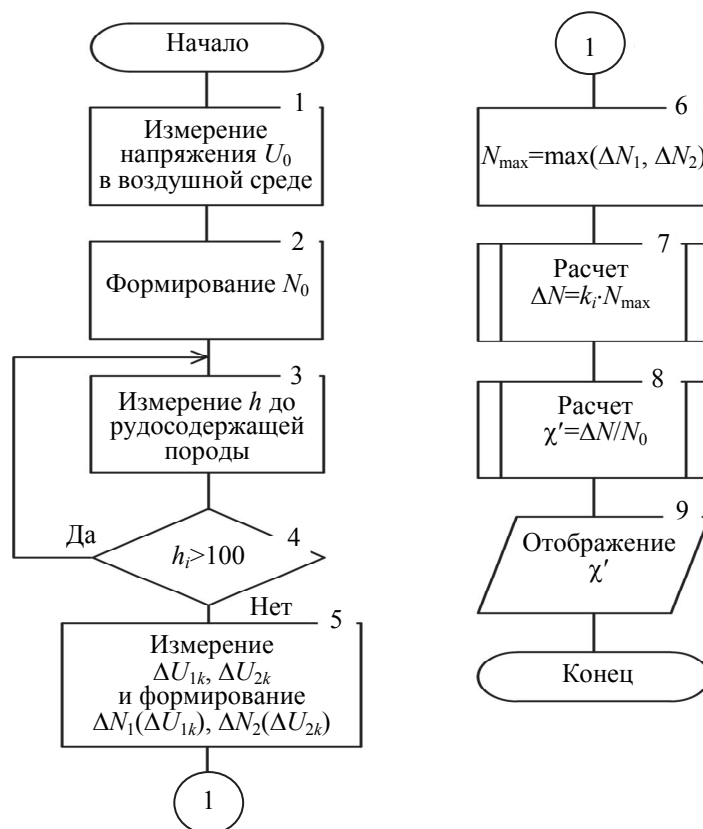


Рис. 3. Блок-схема алгоритма реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантного к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля (режим измерения)

Процесс калибровки устройства выполняется в следующем порядке.

Зонд с размещенными на нем генераторной, двумя компенсационными и приемной катушками размещается горизонтально на минимальном расстоянии над металлическим листом большого размера, например, 2 м×1,2 м. Затем зонд постепенно поднимается на максимальное расстояние от этого листа. В процессе его подъема дискретно через каждый 1 см выполняется измерение расстояния до листа  $h_i$  ультразвуковым датчиком, который формирует импульсы, длительность которых прямо пропорциональна расстоянию до металлического листа. Ширина каждого импульса, поступающего от ультразвукового датчика, измеряется в цифровой форме микроконтроллером вычислительного блока. Полученный цифровой код  $N_{hi}$  используется как адрес ячейки оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), входящего в состав микроконтроллера. При этом аналого-цифровым преобразователем также производится кодирование выходных напряжений  $\Delta U_{1k}$  и  $\Delta U_{2k}$  усилительно-преобразовательных блоков, сравнение полученных кодов  $\Delta N_1(\Delta U_{1k})$  и  $\Delta N_2(\Delta U_{2k})$  и запись наибольшего из них по адресу  $N_{hi}$ , определяемому длительностью выходного импульса ультразвукового датчика.

После завершения процесса подъема зонда от минимального до максимального расстояния от металлического листа выполняется линеаризация характеристики прибора. При этом микроконтроллер вычислительного блока определяет максимальное значение кода  $N_{\max}$ , соответствующее оптимальному расстоянию  $h_{opt}$  до металлического листа, которое принимается за образцовую величину, относительно которой должны корректироваться показания устройства. Затем вычисляются отношения кодов, записан-

ных в ячейки ОЗУ, к максимальному коду, и определяются поправочные коэффициенты  $k_i = N_{\max} / N_{ki}$ . После этого каждое значение  $N_{ki}$ , ранее записанное в ячейку оперативной памяти, умножается на вычисленный для него поправочный коэффициент  $k_i$  и переписывается в ячейку памяти постоянного запоминающего устройства по аналогичному адресу, соответствующему расстоянию зонда до металлического листа, измеренному ультразвуковым датчиком.

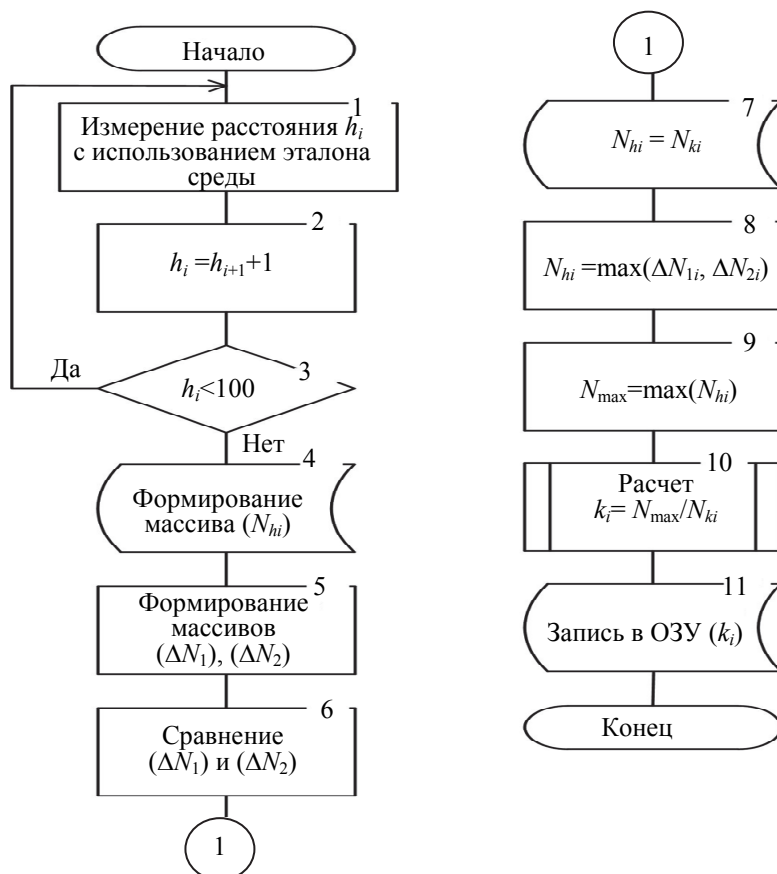


Рис. 4. Блок-схема алгоритма реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантного к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля (режим калибровки)

При выполнении операций в соответствии с алгоритмами (рис. 3, 4) вычислительный блок формирует значения магнитной восприимчивости, практически не зависящие от геометрических размеров зонда и расстояния между зондом и поверхностью среды, и линеаризует характеристику преобразования устройства:

$$\chi' = k_i \frac{N_{\max}}{N_0},$$

где  $N_{\max}$  – кодовое значение наибольшего напряжения на входе вычислительного блока;  $N_0$  – кодовое значение напряжения на приемной катушке в воздушной среде;  $k_i$  – коэффициент масштабирования, вычисленный на этапе калибровки.

При этом при оценке магнитных свойств различных пород необходимо учитывать их конкретные параметры, т.е. умножать полученные результаты на некоторый постоянный коэффициент, который определяется экспериментально и может быть введен в микроконтроллер при окончательной настройке устройства.

Структурная схема устройства, реализующего алгоритм резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, представлена на рис. 5. 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 [15]. Устройство может быть реализовано на современной элементной базе при достижении заданного назначения. Например, можно использовать ультразвуковой датчик измерения расстояния



типа HC-SR04 с диапазоном измерения 2–400 см и разрешением 0,3 см при напряжении питания 5 В<sup>1</sup>, а в качестве вычислительного блока – микроконтроллер типа TMP90C840P<sup>2</sup>.

Погрешность измерения массовой доли железа в магнетитовой руде в соответствии с предложенным алгоритмом ( $\delta_\Sigma$ ) обусловлена группой факторов: погрешностью средства измерения на приемной катушке ( $\delta_{si}$ ), погрешностью ультразвукового датчика ( $\delta_d$ ) и погрешностью формирования дискретных значений коэффициентов масштабирования ( $\delta_k$ ):

$$\delta_\Sigma = \delta_{si} + \delta_d + \delta_k = 0,1 + 0,3 + 1 = 1,4\% .$$

Следует отметить, что указанные источники погрешностей зависят от используемых образцов средств измерения и при этом не зависят от величины геометрического фактора.

Кроме того, применение ультразвукового датчика позволило расширить допустимый диапазон размещения измерительного зонда над исследуемой средой (2–100 см), который более чем в 10 раз превышает диапазон измерения существующих средств.

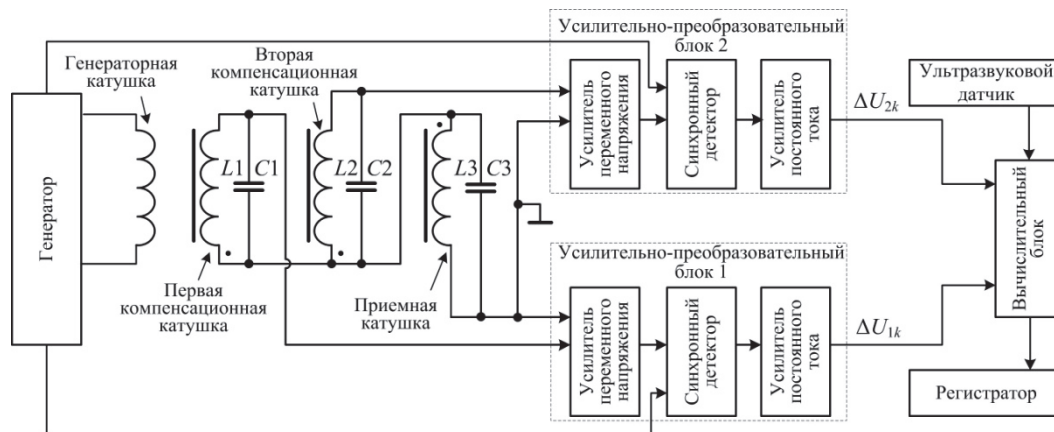


Рис. 5. Структурная схема устройства контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

#### Апробация метода резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

Для оценки эффективности предложенного технического решения было проведено моделирование устройства на электронно-вычислительной машине 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  $f = 1140$  Гц 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  $\pm 10\%$  изменяет разностное напряжение на  $\Delta U_r \approx 80$  мВ на частоте резонанса контуров  $f_r = 1140$  Гц, т.е. амплитуда измеряемого сигнала увеличивается примерно в  $K = \Delta U_r / \Delta U \approx 35$  раз.

При проведении натурального эксперимента генераторная и приемная катушки имели одинаковое число витков  $w = 1000$  и располагались на различном расстоянии друг от друга ( $l_{gp} = (5 - 30)$  см). На генераторную катушку подавалось напряжение  $U_g = 10$  В с резонансной частотой  $f_r = 1140$  Гц, и универсальным микровольтметром В7-78 измерялось напряжение на приемной катушке в двух случаях: без применения резонансного режима (рис. 1) и при подключении резонансного конденсатора  $C$  к приемной катушке с ферромагнитным сердечником (рис. 2). Магнитной средой (контрольным образцом) служила металлическая пластина с размерами  $0,05 \times 1,0$  м, кажущуюся магнитную восприимчивость которой можно принять равной  $\chi_{\max} = 2$ . Контрольный образец размещался на расстоянии 0,1 м от измерительного зонда.

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости напряжения на приемной катушке индуктивности от длины зонда в резонансном режиме работы  $U_{rez}(l_{gp})$  и без применения резонансного режима  $U_{nrez}(l_{gp})$  (рис. 6).

<sup>1</sup> Технические характеристики HC-SR04 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arduino-diy.com/arduino-ultrazvukovoy-datchik-rasstoyaniya>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 29.03.2017).

<sup>2</sup> Технические характеристики микроконтроллера типа TMP90C840P [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.datashit26.com/PDF/538365/TMP90C840P-pdf.html>, свободный. Яз. англ. (дата обращения: 28.03.2017).

Для оценки влияния резонансного режима на чувствительность зонда к контролируемой среде были получены зависимости приращений напряжений на приемной катушке от длины зонда в резонансном режиме  $\Delta U_{rez}(l_{gp})$  и без применения резонансного режима  $\Delta U_{nrez}(l_{gp})$  (рис. 7).

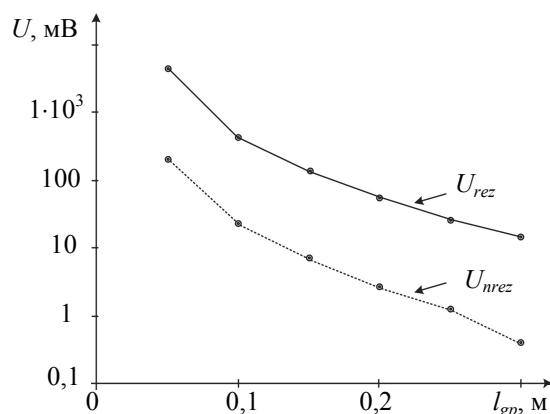


Рис. 6. Зависимость напряжения на приемной катушке от длины зонда

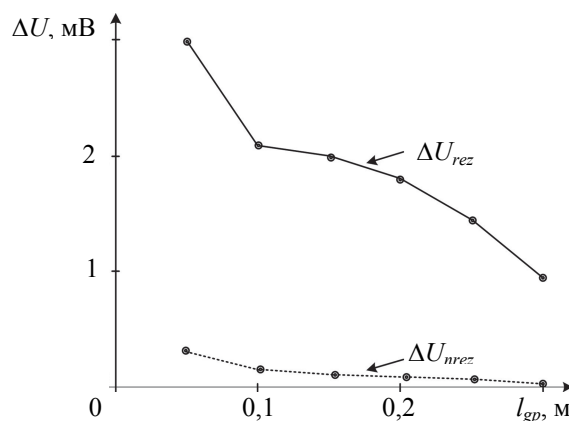


Рис. 7. Зависимость приращений напряжений на приемной катушке от длины зонда

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено следующее:

1. напряжение на приемной катушке, работающей в резонансном режиме, повышается примерно в  $U_{rez}/U_{nrez} \approx 30$  раз (рис. 6);
2. применение резонансного режима работы приемной катушки позволяет увеличить абсолютные значения чувствительности к содержанию железа примерно в  $\Delta U_{rez}/\Delta U_{nrez} \approx 10$  раз (рис. 7);
3. без применения резонансного режима амплитуда напряжения на приемной катушке при длине зонда  $l_{gp} = 0,3$  м уменьшается до сотен–десятков микровольт, что может привести к нестабильности результатов контроля содержания железа в рудной массе из-за влияния помех от электрооборудования при работе прибора контроля в условиях производства.

### Заключение

В работе проанализированы особенности существующего метода и средств индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде. Рассмотренные средства имеют общий недостаток, связанный с низкой точностью измерения. Выявлены способы повышения их чувствительности и точности измерения контролируемых параметров с помощью индуктивных измерительных преобразователей. Повышение чувствительности средств измерения обеспечивается за счет внедрения резонансного режима работы измерительного зонда. Разработан алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде. Его особенностью является использование в расчетах конкретного значения расстояния от измерительного зонда до контролируемой среды, полученное с помощью ультразвукового датчика расстояния. Для определения коэффициентов масштабирования разработан соответствующий алгоритм калибровки прибора. Показано, что применение предложенного алгоритма позволяет повысить чувствительность средств оперативного контроля магнетитовых руд примерно в 10 раз и обеспечить погрешность измерения менее 1,5% в расширенном диапазоне расстояний от зонда до исследуемой среды, который более чем в 10 раз превышает диапазон измерения аналогичных устройств.



## Литература

1. Аузин А.А. Повышение точности опробования магнетитовых руд в их естественном залегании // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2014. № 1. С. 91–94.
2. Аузин А.А. Скважинный индукционный пластовый наклонмер для исследования железорудных месторождений // Геофизическая аппаратура. 1984. № 79. С. 95–98.
3. Яковлев А.А. Аномальное поле включений в модели двухслойной среды при возбуждении сторонним потенциальным полем // Вопросы метода искусственного подмагничивания. 1991. С. 77–84.
4. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 348 с.
5. Шолпо Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра, 1977. 182 с.
6. Кудрявцев Ю.И. Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в естественных условиях. Л.: Недра, 1978. 240 с.
7. Кудрявцев Ю.И., Сараев А.К. Каротаж магнитной восприимчивости. СПб.: СПбГУ, 2004. 269 с.
8. Запорожец В.М. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика. М.: Недра, 1983. 591 с.
9. Бурков Ф.А., Исаев В.И. Геофизические исследования скважин. Томск: ТПУ, 2013. 86 с.
10. Кожиев Х.Х., Ломоносов Г.Г. Рудничные системы управления качеством минерального сырья. М.: МГТУ, 2005. 292 с.
11. Ломоносов Г.Г. Повышение качества продукции отечественного горнорудного производства как основа повышения ее конкурентоспособности // Горный журнал. 2004. № 10. С. 74–78.
12. Кудрявцев Ю.И., Микляев Ю.В. Устройство контроля магнитной восприимчивости. Патент РФ 2006888. Оpubл. 30.01.1994.
13. Миронцов Н.Л. О методе импульсного индукционного каротажа // Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины. 2010. № 7. С. 110–112.
14. Подмастерьев К.В., Баженов И.Н., Иванов Ю.Б. Устройство контроля магнитной восприимчивости среды. Патент РФ 163337. Оpubл. 10.07.2016.
15. Баженов И.Н., Подмастерьев К.В. Средства контроля магнетитовых руд методом оценки магнитной восприимчивости // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2 (316). С. 145–151.
16. Изюмов Н.М., Линде Д.П. Основы радиотехники. 4-е изд. М.: Радио и связь, 1983. 376 с.

## Авторы

**Баженов Иван Николаевич** – сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, 302034, Российская Федерация, bazhen-orel77@mail.ru

## References

1. Auzin A.A. Increases of accuracy of approbation magnetites ores in situ. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 1, pp. 91–94. (In Russian)
2. Auzin A.A. Downhole induction reservoir tiltmeter for exploration of iron ore deposits. *Geofizicheskaya Apparatura*, 1984, no. 79, pp. 95–98. (In Russian)
3. Yakovlev A.A. An anomalous field of inclusions in the model of a two-layer medium exciting by an external potential field. *Voprosy Metoda Iskustvennogo Podmagnichivaniya*, 1991, pp. 77–84. (In Russian)
4. Nagata T. *Magnetizm Gornykh Porod* [Magnetism of Rocks]. Moscow, Mir Publ., 1965, 348 p.
5. Sholpo L.E. *Use of Rock Magnetism to Solve Geological Problems*. Leningrad, Nedra Publ., 1977, 182 p. (In Russian)
6. Kudryavtsev Yu.I. *Induction Methods for Measuring the Magnetic Susceptibility of Rocks and Ores under Natural Conditions*. Leningrad, Nedra Publ., 1978, 240 p. (In Russian)
7. Kudryavtsev Yu.I., Saraev A.K. *Logging of Magnetic Susceptibility*. St. Petersburg, SPbSU Publ., 2004, 269 p. (In Russian)
8. Zaporozhets V.M. *Geophysical Methods of Well Investigation. Reference Book of Geophysics*. Moscow, Nedra Publ., 1983, 591 p. (In Russian)
9. Burkov F.A., Isaev V.I. *Geophysical Investigation of Wells*. Tomsk, TPU Publ., 2013, 86 p. (In Russian)
10. Kozhiev Kh.Kh., Lomonosov G.G. *Miner System of Quality Management for Minerals*. Moscow, MSMU Publ., 2005, 292 p. (In Russian)
11. Lomonosov G.G. Quality improvement of domestic mining production as a basis for increasing its competitiveness. *Gornyi Zhurnal*, 2004, no. 10, pp. 74–78. (In Russian)
12. Kudryavtsev Yu.I., Miklyaev Yu.V. *Device for magnetic susceptibility control*. Patent RU 2006888, 1994.
13. Mironstov N.L. On the method of pulse induction logging. *Institut Geofiziki im. S.I. Subbotina NAN Ukrainy*, 2010, no. 7, pp. 110–112. (In Russian)
14. Podmaster'ev K.V., Bazhenov I.N., Ivanov Yu.B. *Device for monitoring of environment magnetic susceptibility*. Patent RU 163337, 2016.
15. Bazhenov I.N., Podmaster'ev K.V. Magnetite ore controls by magnetic susceptibility evaluation. *Fundamental'nye i Prikladnye Problemy Tekhniki i Tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 145–151. (In Russian)
16. Izumov N.M., Linde D.P. *Fundamentals of Radio Engineering*. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1983, 376 p. (In Russian)

## Authors

**Ivan N. Bazhenov** – employee, Academy of Federal Agency of Protection of the Russian Federation, Orel, 302034, Russian Federation, bazhen-orel77@mail.ru