

На правах рукописи



БАЖЕНОВ Иван Николаевич

МЕТОД И СРЕДСТВА РЕЗОНАНСНОГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Орёл – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном казённом военном образовательном учреждении высшего образования "Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации"

Научный руководитель: доктор технических наук
Басов Олег Олегович

Официальные оппоненты: Кузичкин Олег Рудольфович, доктор технических наук, профессор, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО ВлГУ, профессор кафедры "Управление и контроль в технических системах"

Шибеева Дарья Николаевна, кандидат технических наук, Горный институт – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра "Кольский научный центр РАН", научный сотрудник лаборатории "Предконцентрации и рудоподготовки минерального сырья"

Ведущая организация: Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

Защита состоится 17 мая 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.01 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (ФГАОУ ВО ГУАП) по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО ГУАП (URL: <http://new.guap.ru/>).

Автореферат разослан 12 апреля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.01
доктор технических наук, профессор



Д.К. Шелест

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В условиях современной экономики ведущая роль принадлежит улучшению показателей качества выпускаемой продукции. Максимальная эффективность выплавки чугуна достигается при использовании шихты с высоким содержанием железа, обеспечивающим стабильность показателей качества. Планирование и контроль качества рудной массы и продуктов ее обогащения возможны только при достоверных и точных результатах технологического опробования и оценки состава природного массива.

Актуальность исследований по данной проблеме обусловлена неполнотой и недостаточностью разработок в области теории и практики опробования и, в особенности, непрерывного технологического контроля процесса обогащения руды. Практически геологи и технологи-обогащители горных предприятий нередко методом проб и ошибок разрабатывают близкую к оптимальной методику геолого-технологического картирования, опробования и прогноза качества магнетитовой руды. Основной нерешенной проблемой высококачественного опробования и технологического контроля рудной массы являются взаимные связи различных параметров: размеров проб, плотности и минералогического состава с природными свойствами руд. При этом почти не изучены закономерности статического и пространственного распределения руды в недрах с учетом природных свойств, влияющих на показатели ее обогащения. Без учета этих связей и характеристик распределения невозможно точное определение численных значений параметров опробования рудной массы, чем ограничивается возможность улучшения точности планирования технических показателей обогащения руды. Сравнительно мало статистических данных для того, чтобы обосновать размеры максимально допустимых погрешностей контроля опробования и предъявлять реальные требования к точности аппаратуры контроля. Можно ориентировочно подсчитать, что ошибка планирования качества "сырой" и обогащенной руды на 1% содержания железа может дать убытки в год порядка сотен миллионов рублей, а на 0,1% – соответственно, в десятки миллионов.

На основе результатов исследований и научных трудов ведущих ученых Ю. И. Кудрявцева, М. Н. Альбова, В. А. Глазковского, Н. В. Иванова, Б. И. Пирогова, Г. С. Поротова, В. З. Козина, Л. И. Четверикова, В. Ф. Мягкова и др., а также работ рудничных геологов и специалистов по обогащению Н. А. Никольского, П. И. Самойлова, В. Т. Кирея, П. Н. Докучаева, Б. А. Юрченко, В. Т. Рико и других выявлена возможность улучшения технических характеристик приборов контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, в частности, за счет компенсации влияния мешающих факторов на результаты контроля.

Особенностью магнетита, на которой основаны обогащение руды и методы количественного контроля железного компонента, является наличие у него ярко выраженных магнитных свойств. Для неразрушающего текущего контроля и оценки качества магнетитовых руд широко используется принцип измерения взаимной магнитной индукции между катушками индуктивности, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга в конструкции измерительно-

го зонда. Ограниченная чувствительность соответствующих приборов индукционного контроля обусловлена низким уровнем полезного сигнала на измерительной катушке индуктивности, который ослабляется в тысячи раз по сравнению с амплитудой напряжения на генераторной катушке при большом расстоянии между этими катушками в конструкции зонда. Для выделения полезного сигнала применяют его разложение на квадратурные составляющие и синхронное детектирование с отдельным усилением квадратур и последующим суммированием. Это приводит к усложнению аппаратуры контроля, однако не позволяет повысить ее чувствительность к контролируемым параметрам, особенно при изменении величины зазора между зондом и поверхностью рудной массы.

Применение резонансного режима работы измерительной катушки индуктивности, подключаемой к колебательному контуру, позволяет повысить амплитуду полезного сигнала. Такой метод резонансного контроля основан на взаимодействии исследуемой рудной массы с электромагнитным полем, поэтому его практическое применение невозможно без проведения теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих оценить влияние эффекта резонанса на чувствительность, точность и динамический диапазон приборов индукционного контроля по сравнению с существующей аппаратурой.

Объектом исследования является технологический процесс переработки и обогащения магнетитовой руды.

Предмет исследования – методы и средства индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.

Целью исследования является повышение точности измерений и чувствительности аппаратуры, применяемой для оценки массовой доли железа в технологическом процессе переработки и обогащения магнетитовой руды.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **частные задачи исследования**:

1) анализ особенностей существующих методов и средств индукционного контроля качества руды, влияющих на показатели эффективности технологического процесса обогащения;

2) разработка модели измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек;

3) разработка метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде;

4) разработка новых приборов резонансного индукционного контроля качества руды;

5) разработка алгоритма резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде;

6) проведение экспериментальной проверки разработанных метода, алгоритма и приборов контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.

Научная новизна полученных в диссертационной работе результатов, выводов и рекомендаций заключается в следующем.

1. Разработана модель измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек, позволяющая оценить влияние числа витков,

геометрических размеров и расстояния между ними на чувствительность измерительного зонда.

2. Предложен метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в рудном концентрате, учитывающий влияние формируемого электромагнитного поля на магнитную восприимчивость контролируемой среды и позволяющий повысить чувствительность приборов контроля за счет применения резонансного режима работы измерительного индуктивного преобразователя.

3. Разработан алгоритм резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, позволяющий повысить достоверность результатов такого контроля за счет применения микропроцессорной обработки данных и формирования интегральной оценки, характеризующей количественный состав железа в рудной массе.

Практическая ценность работы заключается в том, что представленные в диссертации модель, алгоритмы и результаты экспериментальных исследований различных индуктивных датчиков являются базой для проектирования и модернизации приборов индукционного контроля, позволяющих повысить точность измерений параметров при оценке качества руды с помощью индуктивных преобразователей. В частности, разработаны приборы резонансного индукционного контроля качества магнетитовой руды с автоматической коррекцией погрешности от изменения зазора между измерительным зондом и поверхностью рудной массы.

Методы и средства исследования. Для выполнения исследований и решения частных задач исследования использовались элементы теории измерений, методов математической статистики, математического, имитационного и схемотехнического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек, позволяющая оценить их взаимное влияние.

2. Метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, обеспечивающий повышение точности измерений и чувствительности средств контроля.

3. Приборы резонансного индукционного контроля качества руды с автоматической коррекцией погрешности в зависимости от изменения зазора между измерительным зондом и поверхностью рудной массы.

4. Алгоритм резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантный к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля.

Обоснованность и достоверность научных положений, основных выводов и результатов диссертации обеспечивается за счет анализа состояния исследований в области теории и практики опробования и непрерывного технологического контроля процесса обогащения руды, согласованности теоретических выводов с результатами экспериментальной проверки, а также апробацией основных теоретических положений диссертации в печатных трудах и докладах на международных и всероссийских научных конференциях.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 3-й Международной научно-практической конференции "Современные материалы, техника и технология" (Курск, 2013 г.); Международной научно-технической конференции "Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении" (Курск, 2016 г.); 7-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Современные инновации в науке и технике" (Курск, 2017); XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых "Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов" (Тула, 2017); 5-ой Международной научно-технической конференции "Качество в производственных и социально-экономических системах" (Курск, 2017).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 9 печатных работах, включая 4 публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки РФ: "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии", "Естественные и технические науки", "Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики"; получены два патента на изобретения и один патент на полезную модель.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы доведены до схмотехнической реализации средств резонансного индукционного контроля, что подтверждается актом использования результатов диссертационной работы в деятельности НΠΑО "Научприбор" и актом внедрения результатов диссертационной работы в деятельности АО "НПФ "Спецмаш".

Вклад автора заключается в развитии теории резонансного преобразования на задачи контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, а также в разработке новых способов и приборов индукционного контроля, обеспечивающих высокую чувствительность и точность измерения за счет применения эффекта резонанса и оптимизации конструкции измерительного зонда.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 8 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (121 наименование) и 2 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, проведен анализ исследуемой научной задачи и обоснован подход к ее решению, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации, публикациях и реализации результатов работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ современного состояния вопросов контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.

Оперативность и низкая стоимость, характерные для индукционного метода контроля массовой доли железа, определили его широкое применение для количественного анализа магнетитовой руды. Для его реализации используется принцип измерения взаимной магнитной индукции между двумя катушками индуктивности, размещенными на фиксированном расстоянии в конструкции

измерительного зонда. Чувствительность соответствующих устройств зависит от величины зазора между зондом и поверхностью рудной массы и от взаимного расположения данных катушек.

Сравнение технических характеристик существующих средств контроля массовой доли железа в рудной массе (РИМВ-3, МКС-4В, ПИМВ-М, СКРП и др.) показывает, что индукционные датчики позволяют обеспечить минимальную погрешность измерения порядка 3–10 % при стабильном расстоянии до контролируемой рудной массы. При этом для дальнейшего улучшения параметров такой аппаратуры необходимы исследования, обеспечивающие повышение чувствительности датчиков и компенсацию влияния величины зазора между зондом и поверхностью рудной массы на точность измерения.

Во второй главе диссертационной работы рассмотрены физические основы индукционных методов измерения магнитной восприимчивости, а также методические аспекты его применения.

Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в условиях естественного залегания основаны на явлении намагничивания геологических сред низкочастотным полем и изучении их вторичного поля. Применение переменного электромагнитного поля облегчает конструирование аппаратуры и исключает влияние постоянного геомагнитного поля.

Выделение информативной составляющей, пропорциональной магнитной восприимчивости среды, выполняется по изменению амплитуды и фазы выходного сигнала измерительной катушки, значения которых зависят от расстояния между генераторной и приемной катушками, а также от величины зазора между зондом и поверхностью контролируемого образца. При этом увеличение расстояния между катушками приводит к значительному уменьшению амплитуды сигнала на приемной катушке, а увеличение величины зазора между зондом и поверхностью рудной массы приводит к уменьшению чувствительности прибора и, как следствие, к повышению влияния внешних наводок и помех на результаты контроля.

Витки приемной катушки пронизываются магнитными потоками первичного и вторичного поля

$$\Phi_0 = \mu_0 \int_{S_{B2}} H_{0k} \partial S_2, \quad (1) \quad \Phi' = \mu_0 \int_{S_{B2}} H'_k \partial S_2, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; H_{0k} и H'_k – проекции магнитных полей на ось приемной катушки; S_{B2} – общая поверхность, опирающаяся на витки приемной катушки. Суммарный магнитный поток $\Phi = \Phi_0 + \Phi'$ индуцирует в приемной катушке ЭДС $E = E_0 + \Delta E$, где $E_0 = -\partial\Phi_0/\partial t$ – первичная ЭДС источника; $\Delta E = -\partial\Phi'/\partial t$ – вторичная ЭДС, обусловленная контролируемой средой.

На практике первичная ЭДС измеряется в удалении от исследуемой магнитной среды (в воздухе), а вторичная – как приращение полной ЭДС $\Delta E = E - E_0$ при наличии этой среды. Для информативного параметра имеет значение относительное приращение ЭДС

$$\Delta E/E_0 = \frac{\partial \Phi'/\partial t}{\partial \Phi_0/\partial t}, \quad (3)$$

которое не зависит от интенсивности первичного поля и является функцией магнитной восприимчивости среды, параметров измерительного зонда и геометрических условий измерения.

Вторичное поле определяется намагниченностью \vec{J}' , которая зависит от суммарной напряженности поля в среде:

$$\vec{J}' = \chi(\vec{H}_0 + \vec{H}'), \quad (4)$$

где χ – магнитная восприимчивость контролируемого вещества. Явное выражение для поля \vec{H}' из (4) можно найти лишь в случае слабомангнитной среды, когда первичное поле существенно преобладает над вторичным ($|\vec{H}'| \ll |\vec{H}_0|$):

$$\vec{H}' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_3} \chi \left[\frac{3(\vec{H}_0 + \vec{R}_{32})}{R_{32}^5} \vec{R}_{32} - \frac{\vec{H}_0}{R_{32}^3} \right] \partial V_3. \quad (5)$$

Для обоснования методики измерений магнитной восприимчивости важное значение имеет случай однородной среды. Величину χ тогда можно вынести из-под знака интеграла (5) и получить линейную зависимость вторичной ЭДС от магнитной восприимчивости слабомангнитной среды:

$$\Delta E/E_0 = G\chi. \quad (6)$$

Безразмерный коэффициент пропорциональности G называют геометрическим фактором, поскольку он зависит от геометрических условий измерения.

Для однородных сплошных сред с плоской поверхностью раздела при их намагничивании первичным неоднородным полем с достаточно сложной структурой формула (6) преобразуется к виду

$$\Delta E/E_0 = G\chi', \quad (7)$$

где $\chi' = \chi/(1 + N\chi)$ – кажущаяся магнитная восприимчивость, а N – коэффициент размагничивания.

Из формулы (7) следует, что, чем больше модуль геометрического фактора $|G|$, тем меньше при измерениях влияет помеха, возникающая из-за изменения первичного магнитного поля. От модуля $|G|$ зависит и чувствительность зонда, измеряемая в милливольтгах на единицу кажущейся восприимчивости χ' :

$$|\Delta E|/\chi' = |G|E_0. \quad (8)$$

Таким образом, с увеличением модуля геометрического фактора $|G|$ и ЭДС E_0 первичного поля пропорционально изменяется чувствительность зонда и, как следствие, возрастает отношение "полезный сигнал/внешняя помеха". Следовательно, для улучшения характеристик аппаратуры индукционного контроля необходимо, во-первых, повышать чувствительность измерительных зондов и, во-вторых, принимать меры для компенсации влияния геометрического фактора на результаты измерения магнитных параметров руды.

В третьей главе диссертации предложены модель измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек и метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.

При проведении теоретических исследований чувствительности измерительного зонда использовались катушки индуктивности с квадратной площадью поперечного сечения обмоток, которые просто наматывать в условиях производства. 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

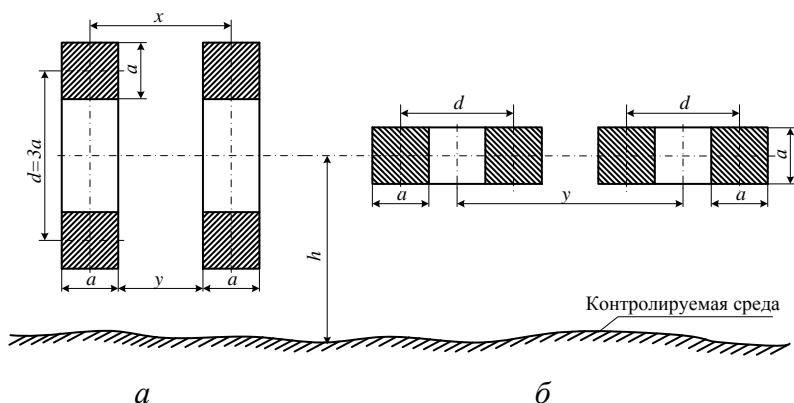


Рисунок 1 – Расположение катушек индуктивности: а – соосно друг другу; б – параллельно друг другу

$$M_1 = kL = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 8,497w^2kd, \quad (9)$$

где k – коэффициент магнитной связи катушек, зависящий от соотношения между расстоянием y между ними и размерами $y/a = (3y)/d$; L – индуктивность катушки; μ_0 – магнитная постоянная; d – средний диаметр катушки.

Взаимная индуктивность катушек с прямоугольной площадью сечения обмоток с параллельными осями (рис. 1, б) вычисляется по формуле:

$$M_2 = \frac{\pi}{32} \mu_0 w^2 \frac{d^4}{a^4} \left(\frac{Z_1}{b_1} - \frac{Z_2}{y} \right), \quad (10)$$

где $b_1 = \sqrt{a^2 + y^2}$; d и a – средний диаметр и длина катушек соответственно; y – расстояние между осями катушек, м; Z_1 и Z_2 – расчетные параметры, определяемые на основе сферических функций Лежандра n -го порядка.

Расчет взаимной индуктивности генераторной и приемной катушек по предложенным моделям (9) и (10) позволил установить основные закономерности влияния числа витков w , геометрических размеров a и расстояния между ними y на чувствительность измерительного зонда.

Анализ полученных зависимостей взаимной индуктивности от расстояния между катушками (рис. 2) показал, что электромагнитное поле, создаваемое генераторной катушкой при соосном расположении, оказывает большее побочное (мешающее) влияние на приемную катушку при измерении магнитной восприимчивости. Установлено, что шестикратное увеличение расстояния между генераторной и измерительной катушками в конструкции зонда приводит к экспоненциальному понижению взаимной индуктивности между ними примерно на два десятичных порядка. Параллельное размещение катушек индуктивности в конструкции зонда приводит к уменьшению взаимной индуктивности примерно в два раза по сравнению с соосным размещением катушек.

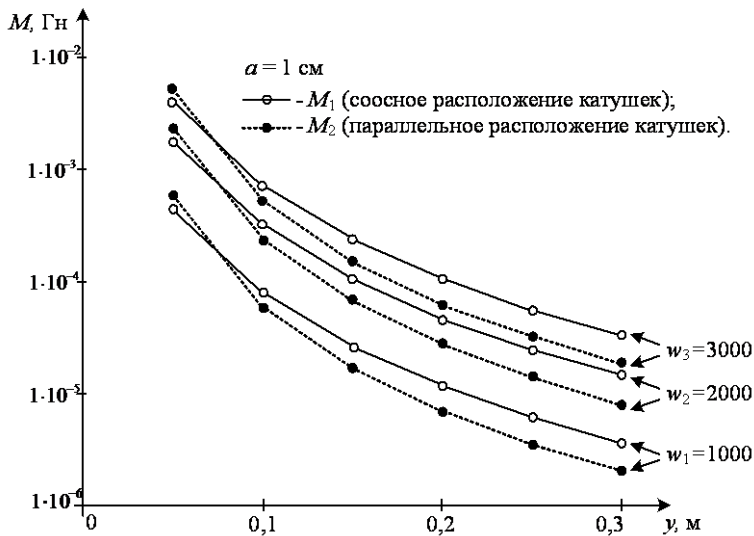


Рисунок 2 – Зависимости взаимной индуктивности катушек с различными геометрическими размерами от расстояния между ними

сохранении экспоненциальной зависимости ее спада при увеличении расстояния между катушками.

На точность индукционного метода контроля влияют субъективная погрешность, связанная с изменением зазора между зондом и рудной массой, и методическая погрешность, обусловленная волнообразной зависимостью чувствительности прибора от расстояния между зондом и поверхностью руды (рис. 3):

$$G = 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{ГП}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{ГП}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}} \cdot \left\{ 1 + \cos^2\beta - 3\cos^2\beta \cdot \left[1 + 4 \left[\frac{h}{l_{ГП}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{ГП}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right\}.$$

Максимальное значение геометрического фактора G зависит от расстояния $l_{ГП}$ между генераторной и приемной катушками индуктивности и достигает

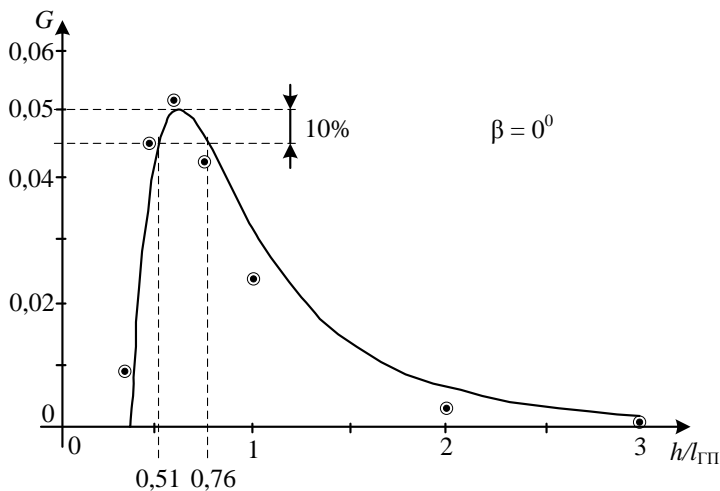


Рисунок 3 – Зависимость геометрического фактора от параметров $l_{ГП}$, h и β двухкатушечного зонда

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 как при соосном, так и при параллельном размещении катушек. В результате моделирования также установлено, что увеличение размера обмоток от $a_1 = 0,005$ м до $a_3 = 0,02$ м повышает примерно в 40 раз взаимную индуктивность катушек при

его при величине зазора $h_{опт} \approx 0,6l_{ГП}$ между зондом и поверхностью рудной массы. При этом разностная ЭДС ΔE двухкатушечного зонда при фиксированном расстоянии между генераторной и приемной катушками достигает максимума на оптимальном расстоянии от поверхности контролируемой рудной массы $h_{опт}$. Приближение зонда к рудной массе или неровность ее поверхности

уменьшают чувствительность прибора и приводят к увеличению погрешности измерения.

Увеличение точности измерения и чувствительности приборов контроля магнитной восприимчивости руды можно обеспечить несколькими путями.

Первый из них связан с повышением точности определения геометрического фактора и, как следствие, с увеличением допустимой высоты размещения зонда над исследуемой средой.

Введение двух компенсационных катушек, установленных на расстояниях $l_{к1} = 0,2l_{ГП}$ и $l_{к2} = 0,8l_{ГП}$ от генераторной катушки (рис. 4) позволяет уменьшить влияние величины зазора h между зондом и исследуемой средой. При этом зависимость чувствительности устройства от величины зазора между зондом и средой при угле $\beta = 0^0$ между ними аппроксимируется следующими выражениями:

$$G_1 = 0,245 \left[\frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{ГП})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{ГП}^2} \right) - \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{к1})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{к1}^2} \right) \right], \quad (11)$$

$$G_2 = \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{ГП})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{ГП}^2} \right) - \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{к2})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{к2}^2} \right), \quad (12)$$

где h – величина зазора между зондом и исследуемой средой; $l_{ГП}$ – расстояние от генераторной до измерительной катушки; $l_{к1}$, $l_{к2}$ – расстояния от генераторной до компенсационных катушек.

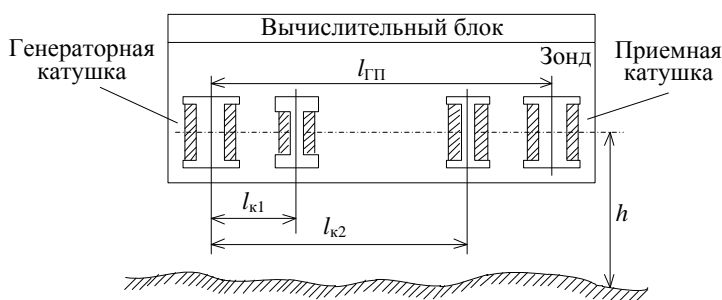


Рисунок 4 – Вариант размещения генераторной, двух компенсационных и приемной катушек в зонде

Применение компенсационных катушек позволяет расширить диапазон измерения в 2 раза и повысить чувствительность устройства в окрестности пересечения графиков G_1 и G_2 от $h_1 = 0,53l_{ГП}$ до $h_2 = 1,02l_{ГП}$ (рис. 5). К недостаткам такого подхода относятся малая амплитуда сигналов на приемной и компенсационных катушках, а также резкое уменьшение

чувствительности прибора при отклонениях $\pm \Delta h$ зонда от оптимального расстояния $h_{опт} = 0,77l_{ГП}$ до поверхности исследуемой среды.

Второй путь повышения точности измерения и чувствительности приборов контроля магнитной восприимчивости руды связан с увеличением приращения $\Delta E/E_0$ ЭДС на приемной катушке.

При питании генераторной катушки от источника переменного напряжения $U_{П} = U_{М} \sin \omega t$ амплитуда намагничивающего тока ограничивается комплексным сопротивлением $\dot{Z}_{Г} = j\omega L_{Г} + R_{ПР}$ катушки, зависящим от ее индуктивности $L_{Г}$ и активного сопротивления $R_{ПР}$ провода обмотки, поэтому

$$I_{\Gamma} = U_{\text{M}} / \sqrt{\omega^2 L_{\Gamma}^2 + R_{\text{пр}}^2} . \quad (13)$$

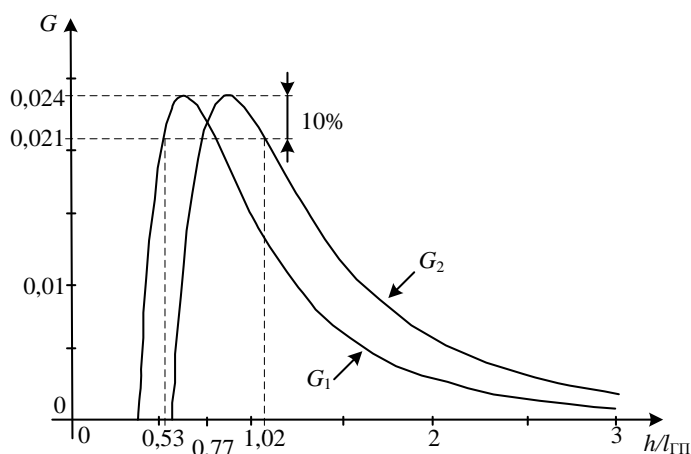


Рисунок 5 – Зависимость геометрического фактора от параметров $l_{\Gamma\Pi}$, h зонда с дополнительными компенсационными катушками

Формирование переменного магнитного потока Φ_0 в генераторной катушке приводит к появлению индуцированной ЭДС в приемной катушке зонда, которая зависит от коэффициента взаимной индукции этих катушек $L' \ll 1$ и, соответственно, от амплитуды I_{Γ} переменного намагничивающего тока $E \sim -L'I_{\Gamma}$.

При этом ЭДС самоиндукции приемной катушки $E \sim -L_{\Pi} I_{\Pi}$ зависит от ее индуктивности L_{Π} и амплитуды I_{Π}

протекающего в ней переменного тока. Если учесть, что значение переменного тока I_{Π} в приемной катушке определяется влиянием магнитного потока Φ_0 , формируемого генераторной катушкой, то для повышения ЭДС на приемной катушке необходимо увеличивать ее индуктивность L_{Π} . Известны два способа повышения индуктивности – увеличение числа витков обмотки w_{Γ} и применение ферромагнитного сердечника с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu_{\text{ф}} \gg 1$. Практически намотка катушки с числом витков более $w_{\Gamma} > 1000$ приводит к увеличению ее активного сопротивления и к технологическим трудностям намотки, поэтому наиболее целесообразно для повышения индуктивности применять ферромагнитный сердечник.

Кроме того, увеличения ЭДС на приемной катушке при фиксированном значении амплитуды I_{Π} индуцируемого переменного тока можно достичь за счет использования эффекта резонанса. В этом случае при подключении конденсатора параллельно приемной катушке образуется параллельный колебательный контур, эквивалентное сопротивление которого на резонансной частоте значительно (в десятки раз) превышает собственное индуктивное сопротивление приемной катушки.

Для учета зависимости показаний приборов контроля от величины зазора между зондом и рудной поверхностью (из-за нелинейной характеристики геометрического фактора (рис. 2)) предложено использовать автоматическую коррекцию показаний посредством применения ультразвукового датчика расстояния между измерительным зондом и поверхностью контролируемой рудной массы. Учитывая, что разрешающая способность современных ультразвуковых датчиков составляет единицы миллиметров, то использование такой коррекции позволяет реализовать универсальную аппаратуру контроля руды с нелинейной характеристикой преобразования и упростить процесс опробования за

счет исключения необходимости точной установки зонда относительно контролируемой поверхности руды.

Совокупность представленных технических решений можно характеризовать как **метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде**, позволяющий при сравнительной простоте реализации обеспечить универсальность высокочувствительного контроля рудной массы.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработанного метода установлено следующее:

1) сравнение приращений напряжений на приемной катушке при различном взаимном расположении катушек показывает, что параллельное расположение генераторной и приемной катушек в составе зонда позволяет примерно в 1,5 раза увеличить чувствительность к изменению содержания железа;

2) применение резонансного режима работы приемной катушки индуктивности позволяет примерно в 8 раз повысить амплитуду измеряемого сигнала;

3) относительная чувствительность к изменению содержания железа при изменении величины зазора между измерительным зондом и поверхностью контролируемой рудной массы не зависит от режима работы и изменяется обратно пропорционально квадрату величины зазора h^2 между катушками зонда и контролируемым образцом, однако применение резонансного режима работы позволяет увеличить абсолютные значения чувствительности примерно в $\Delta U_{рез}/\Delta U_{исх} = 10$ раз;

4) увеличение расстояния между генераторной и приемной катушками уменьшает амплитуду сигнала на приемной катушке до 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.

Экспериментальные значения геометрического фактора G , полученные при измерении магнитной восприимчивости на модели, изготовленной из смеси металлических опилок с кварцевым песком в пропорции 50/50, согласуются с теоретическими данными, поэтому такую зависимость можно использовать при конструировании устройства с реальными габаритными размерами.

Анализ зависимости магнитной восприимчивости от геометрических размеров зонда показал, что значения кажущейся магнитной восприимчивости в резонансном режиме $\chi'_{рез}$, полученные в результате эксперимента близки к истинному значению $\chi'_{max} = 1,76$. При этом значения магнитной восприимчивости в отсутствие резонанса $\chi'_{исх}$ при изменении размеров зонда в пределах 0,2 – 0,3 м резко отличаются от истинных. Относительная погрешность метода резонансного индукционного контроля кажущейся магнитной восприимчивости руды в сравнении с существующим индукционным методом (рис. б) определялась следующим образом

$$\delta = \frac{\chi'_{max} - \chi'}{\chi'_{max}}.$$

Основная погрешность измерения массовой доли железа в магнетитовой руде δ_{Σ} обусловлена погрешностью аналого-цифрового измерения напряжения на приемной катушке (δ_{si}), погрешностью ультразвукового датчика (δ_d), погрешностью дискретности значений коэффициентов масштабирования, используемых для автоматической линейризации характеристики преобразования (δ_k) и погрешностью калибровки (δ_{cal}), учитывающей влияние различных факторов (влажности, температуры и т.п.) на индукционный зонд:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{si} + \delta_d + \delta_k + \delta_{cal} = 0,1 + 0,3 + 1 + 1,5 = 2,9 \% . \quad (14)$$

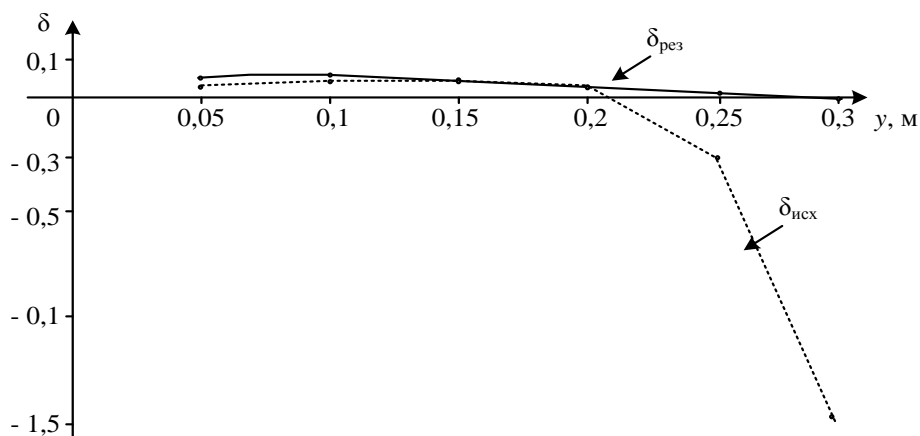


Рисунок 6 – Зависимость относительной погрешности измерительного прибора от геометрических размеров зонда:

$\delta_{рез}$ – относительная погрешность предложенного метода;

$\delta_{исх}$ – относительная погрешность существующего метода

Необходимо отметить, что указанные составляющие инструментальной погрешности зависят от используемых в аппаратуре средств измерения и в рабочем диапазоне контроля не зависят от величины геометрического фактора.

В четвертой главе диссертации

рассмотрены вопросы реализации метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.

В частности, разработан и запатентован прибор индукционного контроля качества руды с дополнительными компенсационными катушками (рис. 4), в которые введены ферромагнитные сердечники с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu \geq 1000$. Для обеспечения эффекта резонанса в его модифицированной версии (рис. 7) к этим катушкам с индуктивностями L_1, L_2, L_{II} подключены конденсаторы C_1, C_2, C_3 и установлена частота, равная частоте электромагнитного поля генераторной катушки:

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1} = 1/2\pi\sqrt{L_2C_2} = 1/2\pi\sqrt{L_{II}C_3} . \quad (15)$$

Для обеспечения минимальной требуемой глубины проникновения магнитного поля в магнетитовую руду $H_9 = 0,208/\sqrt{f_p\sigma \cdot 10^{-7}}$ и с учетом проводимости магнетита ($\sigma_M \approx 1500 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$) была выбрана частота резонанса $f_p = 1140$ Гц.

Разработанное и запатентованное решение (рис. 7) позволило в восемь раз повысить амплитуду сигнала на приемной катушке и, соответственно, уменьшить относительную погрешность измерения за счет ослабления влияния электромагнитных наводок и помех на результаты преобразования. Использование ультразвукового датчика позволило обеспечить инвариантность метода резо-

нансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде к геометрическому фактору.

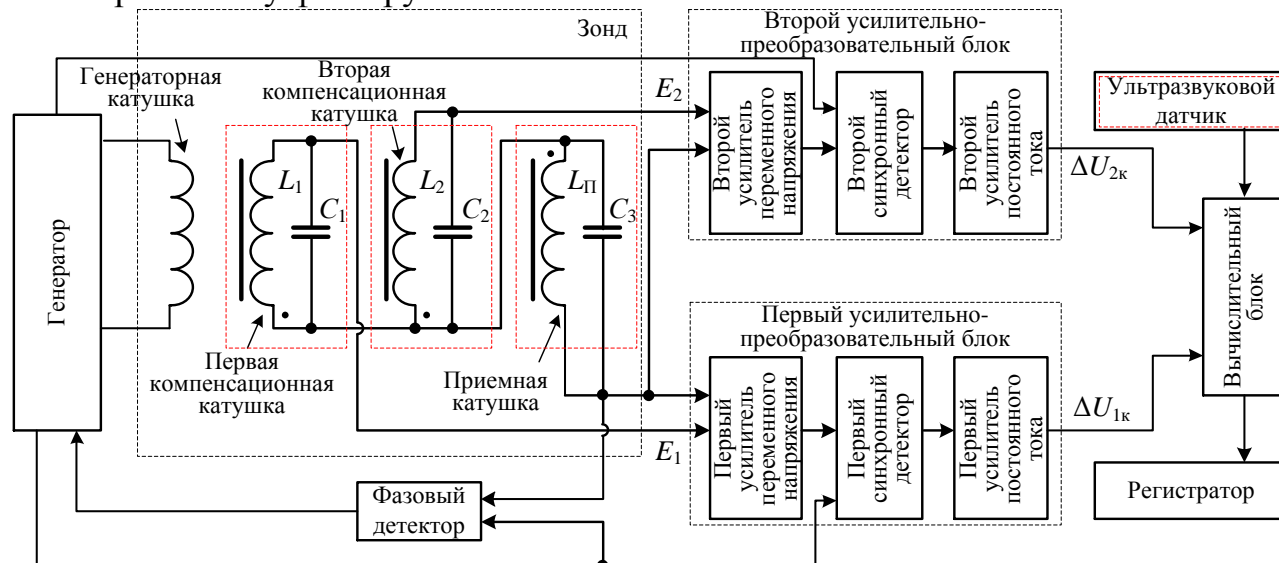


Рисунок 7 – Прибор резонансного индукционного контроля магнитной восприимчивости руды

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 $U_r = 10$ В и частотой $f_r = 1140$ кГц изменение индуктивности одной из компенсационных катушек на 10 % относительно начального значения $L_1 = 0,1$ Гн приводит к появлению разностного напряжения $\Delta U_1 \approx 2,28$ мВ;

2) при подключении конденсаторов с одинаковой емкостью $C = 200$ нФ параллельно приемной и компенсационным катушкам изменение индуктивности одной из них на ± 10 % изменяет разностное напряжение на $\Delta U_{1к} \approx 80$ мВ на частоте резонанса контуров $f_p = 1140$ кГц при входных сопротивлениях усилителей переменного напряжения, составляющих 10 кОм. При этом амплитуда измеряемого сигнала увеличивается в $K = \Delta U_{1к} / \Delta U_1 = 80 / 2,28 \approx 35$ раз.

Увеличение амплитуды сигналов, формируемых на выходах двух компенсационных и приемного контуров, позволяет использовать в составе измерительного зонда усилители переменного напряжения с небольшими коэффициентами усиления и получать на входах синхронных детекторов напряжения в единицы вольт. Наличие сигналов такого уровня позволяет значительно уменьшить влияние инструментальных погрешностей синхронных детекторов, обусловленных коммутационными импульсами ключевых элементов, а также понизить относительное влияние напряжения начального смещения и температурного дрейфа усилителей постоянного тока на точность преобразования. При этом одновременно ослабляется влияние погрешности квантования напряжения в аналого-цифровых преобразователях на точность контроля качества руды.

Кроме того, за счет повышения амплитуды сигналов на выходах компенсационных и приемного колебательных контуров дополнительно ослабляется

относительное влияние внешних наводок и помех, что позволяет практически значительно уменьшить случайную погрешность преобразования.

Использование фазового детектора в цепи обратной связи генератора обеспечивает подстройку частоты резонанса колебательного контура индукционного зонда в процессе калибровки.

Следовательно, применение предложенного резонансного метода позволяет повысить как чувствительность аппаратуры, так и точность контроля массовой доли железа в магнетитовой руде за счет увеличения амплитуды измеряемых сигналов и ослабления помех.

Алгоритм резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде на основе разработанного метода включает в себя следующие шаги.

1. Размещение измерительного зонда вдали от исследуемой магнитной среды и измерение напряжения "в воздухе" U_0 .

2. Аналого-цифровое преобразование измеренного значения U_0 и формирование соответствующего цифрового кода $N_0 = F(U_0)$.

3. Размещение зонда над поверхностью рудной массы и измерение величины зазора h_i между зондом и поверхностью этого контролируемого объекта. Максимальная высота размещения зонда выбирается на этапе калибровки устройства, и в данном случае не должна превышать предельного значения, составляющего 100 см.

4. Контроль правильности размещения измерительного зонда, который должен располагаться параллельно поверхности контролируемой рудной массы, и в случае невыполнения условия $h_i > 100$ переход к шагу 4.

5. Измерение значений напряжений на выходах первого и второго усилительно-преобразовательных блоков при фиксированной величине зазора между зондом и исследуемой средой $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$.

6. Выполнение аналого-цифрового преобразования измеренных значений напряжений $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$, и формирование соответствующих цифровых кодов $\Delta N_1(\Delta U_{1к})$ и $\Delta N_2(\Delta U_{2к})$.

7. Сравнение полученных кодов и выбор наибольшего из них для использования в дальнейших расчетах, учитывая, что значение наибольшего цифрового кода $N_{\max} = \max(\Delta N_1, \Delta N_2)$ соответствует максимальной амплитуде напряжения, соответствующей массовой доле железа в контролируемой массе руды.

8. Расчет приращения напряжения, полученного в процессе контроля, по результатам вычитания исходного кода $N_0 = F(U_0)$ и кода N_{\max} , полученного при исследовании среды, и получение цифрового кода $\Delta N = k_i \cdot N_{\max}$.

Корректировка значения ΔN производится за счет изменения масштабирующего коэффициента k_i , который формируется *при калибровке прибора контроля массовой доли железа в магнетитовой руде*. В процессе калибровки на основе разработанного алгоритма учитываются особенности применения устройства на различных этапах добычи, технологической переработки и обогащения железной руды.

9. Расчет кажущейся магнитной восприимчивости исследуемой магнетитовой среды $\chi' = \Delta N/N_0$ и его представление в соответствующей размерности.

10. Расчет массовой доли железа $W = k_{md}\chi'$ с учетом коэффициента пересчета k_{md} . Запоминание и отображение рассчитанного значения массовой доли железа на дисплее регистратора или запоминание в оперативной памяти микроконтроллера для сравнения с допустимым по условиям контроля граничным значением.

Следует отметить, что вычисление результатов контроля качества рудной массы реализуется с учетом показаний ультразвукового датчика, формирующего импульсы разной длительности в зависимости от величины зазора между измерительным зондом и поверхностью рудной массы для учета геометрического фактора.

Предложенные средства резонансного индукционного контроля можно использовать на различных этапах добычи, технологической переработки и обогащения железной руды.

Применение средств резонансного индукционного контроля *при оперативном опробовании стенок горных выработок*, а также *при оценке качества рудной массы в навалах и на самосвалах* с возможностью сортировки "руда / порода" позволяет достичь максимального извлечения полезных ископаемых и добиться оптимального соотношения между затратами на обогащение и качеством руд. На каждом горно-обогатительном комбинате устанавливается "порог" по содержанию железа в руде, выше которого рудный материал считается кондиционным и идет на дальнейшую переработку – дробление и обогащение. Рудный материал, содержание железа в котором ниже установленного "порога", направляется в отвал или на склад некондиционной руды. Выбраковка нерудной массы из добычного забоя дает реальный экономический эффект: – не обогащаются кондиционные руды, не перегружаются тракты сепарации руды, и кондиционная руда не вывозится в отвал.

Применение средств резонансного индукционного контроля *в составе рудоконтролирующих станций непосредственно на рудниках и карьерах* по добыче железной руды и позволяет обеспечить:

- оперативную сортировку рудной массы путем экспрессного опробования качества руды, загруженной в автосамосвал, бесконтактным методом;
- ведение локальной базы данных измерений;
- выдачу оперативной информации из базы данных в информационную сеть предприятия;
- формирование оперативных и итоговых (за смену, сутки) сводок по содержанию железа;
- отображение оперативной информации рудоконтролирующих станций в виде графиков или таблиц на мониторе компьютера;
- распечатку оперативных и итоговых сводок на локальном принтере оператора для оценки и корректировки технологического процесса производства.

Не менее важным местом применения средств резонансного индукционного контроля в технологической схеме переработки и обогащения железной

руды является *сепарация и оценка качества готового рудного концентрата*. О значении массовой доли железа в магнетитовой руде, концентрате и "хвостах" можно судить по сигналу магнитной индукции пространственно распределенного магнитного поля в рабочей зоне сепаратора. Расчет массовых долей железа в исходной руде $A^{(j)}$, концентрате $B^{(j)}$ и "хвостах" $N^{(j)}$ магнитного j -го сепаратора производится по уравнениям регрессии

$$A^{(j)} = a_{0j} + a_{1j} \overline{BR}^{(j)}, \quad B^{(j)} = b_{0j} + b_{1j} \overline{BK}^{(j)}, \quad N^{(j)} = n_{0j} + n_{1j} \overline{BX}^{(j)}, \quad (16)$$

где $\overline{BR}^{(j)}$, $\overline{BK}^{(j)}$, $\overline{BX}^{(j)}$ – среднеарифметические значения магнитных индукций соответственно в зонах подачи исходной руды, выделения концентрата и рудных "хвостов"; a_{0j} , a_{1j} , b_{0j} , b_{1j} , n_{0j} , n_{1j} – коэффициенты уравнения регрессии, определяемые методом наименьших квадратов по результатам экспериментальных данных.

Решение задачи (16) позволяет существенно повысить качество железорудного концентрата на действующих обогатительных фабриках, повысить его металлургическую ценность и уменьшить суммарные затраты на производство чугуна.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

В приложениях представлены копии патентов РФ на изобретение и полезную модель, актов внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача разработки метода и алгоритма реализации резонансного индукционного контроля, обеспечивающих повышение точности измерений и чувствительности аппаратуры, применяемой для оценки массовой доли железа в технологическом процессе переработки и обогащения магнетитовой руды. На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы.

1. На основе сравнительного анализа существующих методов и средств индукционного контроля качества руды выявлены пути увеличения точности измерения и чувствительности приборов контроля ее магнитной восприимчивости.

2. Разработана модель измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек. Установлено, что зонд с катушками, параллельными друг другу и ортогональными плоскости исследуемой поверхности, обладает большей (примерно в 1,5 раза) чувствительностью к изменению содержания железа по сравнению с зондом с соосными катушками, параллельными плоскости исследуемой поверхности.

3. Предложен метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, обеспечивающий увеличение чувствительности и точности контроля качества руды путем введения двух компенсационных катушек в конструкцию измерительного зонда, повышения ЭДС на приемной катушке за счет увеличения ее индуктивности и использования эффекта резонанса.

4. На основании предложенного метода разработаны приборы индукционного контроля качества руды с дополнительными компенсационными катуш-

ками. Применение резонансного режима работы приемной катушки индуктивности позволяет примерно в 8 раз повысить амплитуду измеряемого сигнала и на порядок увеличить приращение напряжения по сравнению с работой в режиме без резонанса. Автоматическая компенсация погрешности в зависимости от изменения величины зазора между измерительным зондом и поверхностью руды обеспечивается использованием ультразвукового датчика.

5. Разработан алгоритм резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, позволяющий повысить достоверность результатов такого контроля за счет применения микропроцессорной обработки данных и формирования интегральной оценки, характеризующей количественный состав железа в рудной массе.

6. Экспериментально подтверждена эффективность применения разработанных метода и прибора резонансного индукционного контроля массовой доли железа в рудной массе на основе моделирования процессов контроля. Применение метода резонансного индукционного контроля магнитной восприимчивости среды с микропроцессорной обработкой данных и автоматической коррекцией инструментальных погрешностей преобразования позволяет реализовать средства оперативного опробования руды с погрешностью не более 2,9 % при линейаризации характеристики преобразования ультразвуковым датчиком.

Полученные результаты соответствуют п. 1 "Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий", п. 3 "Разработка, внедрение и испытание приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами" паспорта специальности 05.11.13 – "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий" (технические науки).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня Минобрнауки РФ

1. **Баженов, И.Н.** Способ двухпараметрического контроля толщины немагнитных металлических покрытий [Текст] / И.Н. Баженов, Ю.Б. Иванов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2014. – № 2 (304). – С. 127–132. (Личное участие 50 %)

2. **Баженов, И.Н.** Средства контроля магнетитовых руд методом оценки магнитной восприимчивости [Текст] / И.Н. Баженов, К.В. Подмастерьев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2016. – № 2 (316). – С. 145–151. (Личное участие 50 %)

3. **Баженов, И.Н.** Сравнительная оценка чувствительности датчиков контроля магнетитовых руд [Текст] / И.Н. Баженов // *Естественные и технические науки*, 2016. – № 7 (97). – С. 54–57.

4. **Баженов, И.Н.** Алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде / Баженов И.Н. // *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.

Основные статьи и доклады в материалах конференций

5. **Баженов, И.Н.** Двухпараметровый контроль толщины электропроводных покрытий [Текст] / И.Н. Баженов, Ю.Б. Иванов // Материалы 3-я Международной научно-практической конференции "Современные материалы, техника и технология". В 3-х томах. Том 2 / под общ. ред. А. А. Горохова. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 67–70. (Личное участие 50 %).

6. **Баженов, И.Н.** Устройство контроля магнитной восприимчивости среды [Текст] / И.Н. Баженов, Ю.Б. Иванов // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции "Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении" / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – С. 11–14. (Личное участие 50 %).

7. **Баженов, И.Н.** Алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде [Текст] // Современные инновации в науке и технике: Сборник научных трудов 7-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (13-14 апреля 2017 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО "Университетская книга", 2017. – С. 29–33.

8. **Баженов, И.Н.** Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде [Текст] // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: Сборник материалов XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (21.04.2017 г.) / редкол.: Воротилин М.С. (отв. ред.) – Тула : Тульский государственный университет, Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 153–157.

9. **Баженов, И.Н.** Обоснование конструкции индукционных датчиков контроля магнетитовых руд [Текст] // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сборник научных трудов 5-ой Международной научно-технической конференции (21.04.17 г.) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО "Университетская книга", 2017. – С. 26–29.

Патенты на изобретения и полезные модели

10. Патент на изобретение № 2533756 Российская Федерация : МПК G 01 N 27/90. Устройство двухпараметрового контроля толщины электропроводных покрытий / Баженов И.Н., Богданов Н.Г., Иванов Ю.Б.; заявитель и патентообладатель Академия ФСО России. – №2013123328/28 ; заявл. 21.05.2013; опубл. 20.11.2014, Бюл. №32. – 6 с. (Личное участие 50 %).

11. Патент на полезную модель № 163337 Российская Федерация : МПК G 01 R 33/16. Устройство контроля магнитной восприимчивости среды / Баженов И.Н., Иванов Ю.Б., Подмастерьев К.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ПГУ". – № 2015149581/28; заявл. 18.11.2015; опубл. 10.07.2016. – 8с. (Личное участие 50 %).

12. Патент на изобретение № 2632265 Российская Федерация : МПК G 01 V 3/16. Устройство для оперативного опробования магнетитовых руд / Подмастерьев К.В., Баженов И.Н., Иванов Ю.Б.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ОГУ им. И.С. Тургенева". – №2016111578; заявл. 28.03.2016; опубл. 03.10.2017, Бюл. №28. – 8 с. (Личное участие 40 %).