

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ВОЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"АКАДЕМИЯ ФЕДЕРАЛЬНОЙ СЛУЖБЫ ОХРАНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
Басов Олег Олегович

Орёл – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГNETИТОВОЙ РУДЕ.....	10
1.1 Состав железных руд.....	11
1.2 Классификация методов анализа количественного содержания железа	12
1.3 Определение содержания железа в рудах индукционным методом.....	14
1.4 Анализ метрологических характеристик средств контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.....	18
1.4.1 Рудничный измеритель магнитного влияния среды РИМВ-3.....	18
1.4.2 Полевой измеритель магнитной восприимчивости ПИМВ-М.....	24
1.4.3 Прибор магнитного опробования МКС-4В.....	29
1.4.4 Измеритель магнитной восприимчивости <i>Bartington MS2/MS3</i>	32
1.5 Выводы по первой главе.....	36
2 КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕ- ТИТОВОЙ РУДЕ ИНДУКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ.....	37
2.1 Физические основы индукционных методов измерения магнитной вос- приимчивости.....	37
2.1.1 Структура измеряемого магнитного поля.....	39
2.1.2 Вычисление геометрического фактора и коэффициента размагничи- вания.....	53
2.2 Методика индукционных измерений магнитной восприимчивости.....	57
2.3 Оценка магнитного момента генераторной катушки.....	60
2.4 Исключение влияния магнитного момента приемной катушки.....	65
2.5 Выводы по второй главе.....	69
3 МЕТОД РЕЗОНАНСНОГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАССО- ВОЙ ДОЛИ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В РУДЕ	70
3.1 Измерение магнитной восприимчивости на плоской поверхности.....	70
3.2 Модель измерительного зонда с различным расположением генератор- ной и приемной катушек	88

3.3 Метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде.....	94
3.4 Экспериментальные исследования метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа.....	99
3.5 Выводы по третьей главе.....	106
4 СРЕДСТВА РЕЗОНАНСНОГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ.....	108
4.1 Прибор резонансного индукционного контроля качества магнетитовой руды.....	108
4.2 Алгоритм резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантный к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля.....	113
4.3 Применение средств резонансного индукционного контроля в технологической схеме добычи, переработки и обогащения железной руды.....	120
4.4 Выводы по четвертой главе.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Копии патентов РФ на изобретения и полезную модель.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Копии актов внедрения.....	143

ВВЕДЕНИЕ

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, В. Т. Рико, Б. А. Юрченко 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 измерительного 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) проведение анализа особенностей существующих методов и средств индукционного контроля качества руды, влияющих на показатели эффективности технологического процесса обогащения;

2) разработка модель 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 схемотехнической 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 применительно к его использованию для 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.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСОВ КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ

Одним из важнейших показателей качества рудной массы являются качественный и количественный составы руд и уровень стабильности этих составов. Требования потребителей к качеству рудоминерального сырья сводятся, в общем случае, к необходимости обеспечения:

- определенного уровня содержания основных компонентов, т. е. чтобы средние значения компонентов в руде за определенные календарные сроки максимально соответствовали регламентированному или согласованному уровню;
- минимизации отклонений содержаний компонентов в рудном потоке от среднего значения за определенные интервалы времени и между отдельными партиями руды;
- максимальной однородности состава руды внутри каждой партии или за интервал времени и др.

Выполнение этих требований обеспечивается путем решения технической задачи, в основе которой лежат определенные количественно-качественные зависимости между объемами и качеством руды в этих объемах [1].

В связи с этим для оценки технологических свойств магнетитовых руд, а также при подготовке их к дальнейшей переработке и обогащению необходимо установление массовой доли полезного минерала.

Основным минералом железорудных месторождений является магнетит. Особенностью магнетита, на которой основаны обогащение руды и методы количественного контроля железного компонента, является наличие у него ярко выраженных магнитных свойств [1]. Как правило, выделение железа в составе руды выполняется с помощью электромагнитов, которые размещаются над движущейся по транспортеру рудной массе.

Значение массовой доли железа в магнетитовых рудах и продуктах их переработки может использоваться для контроля качества технологических процессов на обогатительной фабрике.

1.1 Состав железных руд

Железо является одним из наиболее распространенных элементов земной коры, оно входит в состав большинства природных образований. В основном распространены крупные природные концентрации железа в виде его окислов, солей кислородных кислот и сульфидов. Железной рудой называется только такая горная порода, которая по содержанию железа и форме его нахождения может быть использована для промышленного извлечения металла.

Наиболее ценными в промышленном отношении являются рудные массы, в которых преобладающими минералами являются безводные окислы железа: магнетит ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), содержащий 72,36 % железа, и гематит (Fe_2O_3), содержащий 69,96 % железа [2].

Вторую большую группу железных руд представляют бурые железняки ($\text{Fe}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), содержащие железо в форме гидратированных окислов. В зависимости от процентного содержания воды различают отдельные виды минералов – гидрогематит, гетит, лимонит [2].

Третью группу железных руд представляют карбонатные руды, содержащие 48,30 % железа в виде минерала сидерита (FeCO_3) [2].

Среди наиболее богатых железом минералов следует отметить фаялит ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), шамуазит ($3\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), содержание железа в которых составляет 19–39 % [2].

Железные руды содержат большое количество различных примесей. Некоторые из этих примесей в процессе доменной плавки переходят в чугун, что ухудшает качество выплавляемого металла. К вредным примесям относятся сера, фосфор, мышьяк и цинк.

Сера чаще всего представлена пиритом, реже другими сульфидами. Даже при небольшом содержании сера делает чугун и сталь хрупкими.

Фосфор обычно находится в железных рудах в виде апатита, а иногда в виде вивианита или сложных фосфатов. Содержание фосфора определяет способ выплавки стали, поэтому при его определении требуется высокая точность.

Содержание фосфора в магнетитовых рудах обычно не превышает сотых долей процента [2].

Мышьяк может содержаться в железных рудах в форме арсенопирита и леллингита, иногда в виде солей мышьяковой кислоты. Мышьяк нередко встречается в рудах осадочного происхождения (бурых железняках) и является вредной примесью даже при малом содержании (сотые доли процента), так как придает чугуну хрупкость [2].

Цинк встречается в виде сфалерита. Вредное влияние цинка сказывается уже при содержании его около 0,1 % [2].

К спутникам железа, улучшающим качество выплавляемого чугуна или стали и извлекаемым в процессе обогащения в качестве самостоятельного продукта, относятся марганец, ванадий, хром, титан, кобальт, никель и медь.

Практически содержание железа и его соединений в магнетитовых рудах колеблется в широких пределах – от 19 до 72 %. Изучение качественного и количественного состава руды необходимо для совершенствования процессов извлечения наиболее ценного минерала. Кроме этого, знание количественного состава магнетитовых руд позволяет выбирать руды, пригодные для промышленного использования. К разрабатываемым богатым рудам относятся преимущественно магнетитовые руды с содержанием железа в них более 50 %, к бедным – магнетитовые руды, в которых содержание железа составляет менее 25 %.

1.2 Классификация методов анализа количественного содержания железа

Количественный анализ предназначен для установления массовой доли каждого компонента в анализируемой руде. Ему предшествует качественный анализ, устанавливающий, какие компоненты (минералы, элементы, молекулы) присутствуют в анализируемом материале. Количественный анализ бывает трех видов: полный, частичный, общий. При полном количественном анализе устанавливается количественный состав всех компонентов, присутствующих в анализируемой пробе. Полный анализ требует больших затрат времени и труда.

При частичном анализе определяется содержание только требуемых компонентов. Общий анализ устанавливает содержание каждого элемента в анализируемом образце независимо от того, в состав каких соединений они входят.

Методы количественного анализа можно разделить на три большие группы: химические, физические, физико-химические.

Химические методы основаны на использовании различных по типу химических реакций: обменных, осадительных, окислительно-восстановительных и реакций комплексообразования. К химическим методам относятся гравиметрический и титриметрический (объемный) методы анализа.

Гравиметрический (весовой) метод основан на точном измерении массы вещества известного состава, химически связанного с определяемым компонентом и выделенного в виде соединения или в виде простого вещества.

Гравиметрический анализ основан на законе сохранения массы вещества при химических превращениях и является наиболее точным из химических методов анализа (его погрешность 0,1 %), но длителен и трудоемок [3–5].

Титриметрический (объемный) метод анализа основан на введении в точно измеренный объем раствора анализируемого вещества отмеренного объема раствора известной концентрации – титранта. Титрант вводится до тех пор, пока анализируемое вещество полностью не прореагирует с ним. Этот момент называют конечной точкой титрования и устанавливают с помощью специальных химических индикаторов или инструментальными методами [3–5]. Среди химических методов количественного анализа объемный метод является самым распространенным.

В настоящее время химические методы анализа являются основными и используются только в химических лабораториях. При этом химические методы во многих случаях не отвечают возросшим требованиям к анализу, таким как высокая чувствительность, оперативность, селективность и автоматизация. Кроме того, химические методы анализы вследствие большой трудоемкости позволяют выполнять только выборочный контроль качества исследуемых веществ. Этим недостатков лишены физические методы анализа.

1.3 Определение содержания железа в рудах индукционным методом

В основе индукционного метода лежит пропорциональная зависимость намагниченности насыщения исследуемого материала от массовой доли магнитных компонентов. Используемые приборы основаны, главным образом, на двух принципах действия: магнитовесовые приборы, определяющие силу втягивания контролируемого образца в неоднородное магнитное поле, и индуктивные приборы, измеряющие намагниченность насыщения материала пробы при намагничивании постоянным или импульсным магнитным полем [11, 12].

Содержание железа в рудах в основном определяется наличием магнетита. Наилучшим материалом для определения содержания железа в рудах индукционным методом является измельченная проба руды или шлам из буровзрывных скважин [14]. Для измерения применяют специальные приборы, так называемые феррометры (рис. 1.1).

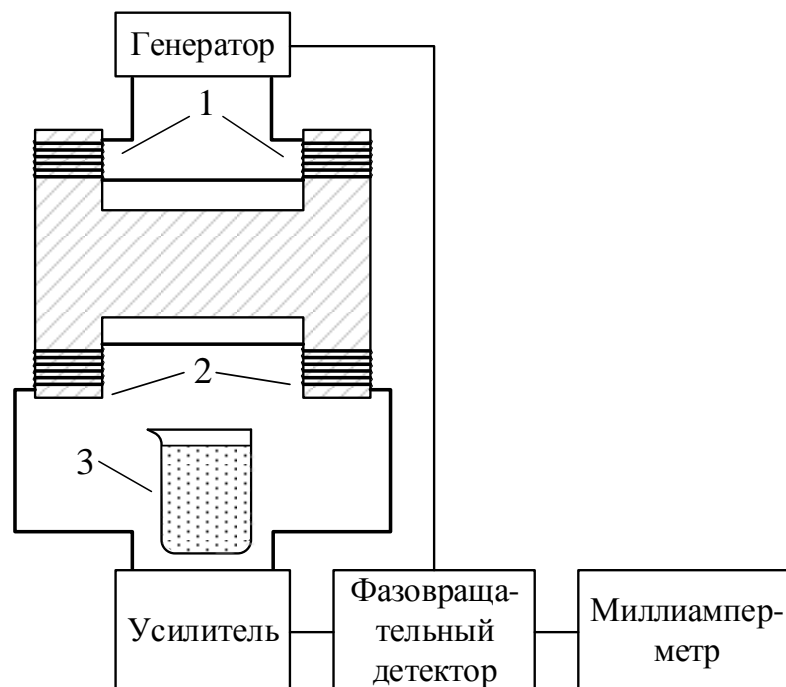


Рисунок 1.1 – Структурная схема феррометра

1 – генераторные катушки; 2 – измерительные катушки; 3 – измерительный стаканчик с измельченной рудой

В таком приборе используется Н-образный сердечник, на который намотаны генераторные и измерительные катушки. Сигнал с выхода генератора частотой 200 Гц подается на индукционные катушки. Магнитное поле, возникающее в датчике без пробы руды, балансируется второй парой катушек, расположенных в нижней части Н-образного сердечника. Без образца магнитной руды сигналы с усилителя и генератора, поступая на фазовращательный детектор, складываются, и миллиамперметр показывает нулевой ток.

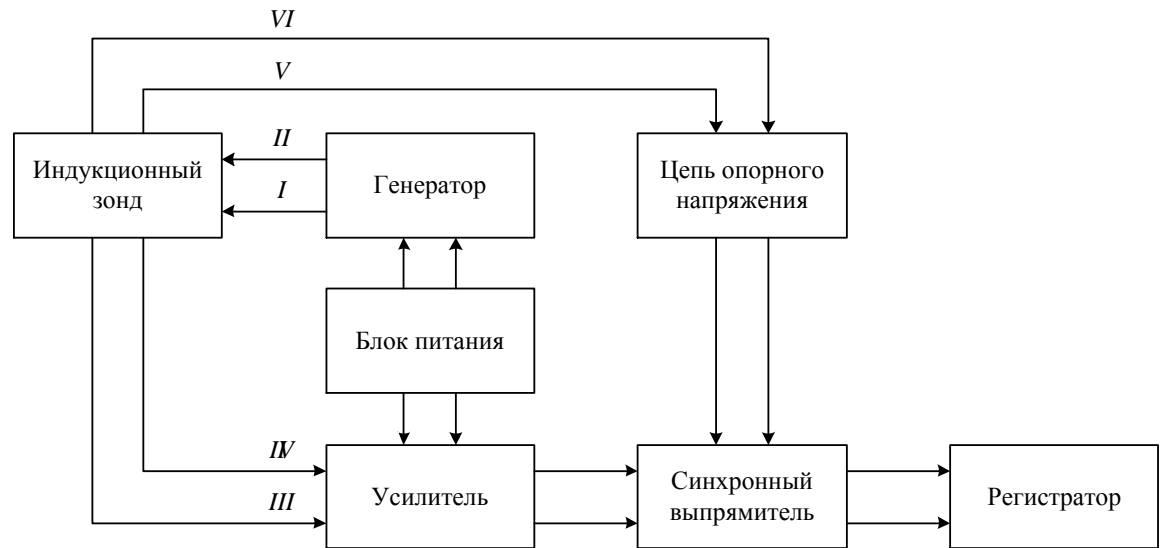
Измерительный стаканчик с измельченной рудой устанавливается на датчике прибора. При внесении в поле датчика пробы магнитной руды баланс поля нарушается. С датчика на усилитель поступает сигнал, пропорциональный количеству внесенного магнитного материала, и фиксируется отклонение от нуля. Индикатор прибора градуируется по эталонным порошковым пробам, содержание железа в которых определяется с большой точностью химическим анализом. После установки пробы руды на датчике производится отсчет по индикатору, и по специальному графику определяется содержание железа в пробе. Для получения истинных значений железа необходимо учитывать поправки на влажность и плотность, которые обычно вносятся в расчетный график.

Опытные работы, проведенные кафедрой геофизики Уральского государственного горного университета, показали хорошую сходимость результатов таких измерений с химическими анализами тех же проб – ошибка для руд с содержанием магнитного железа от 5 до 30 % не превышает значения 1 % [15].

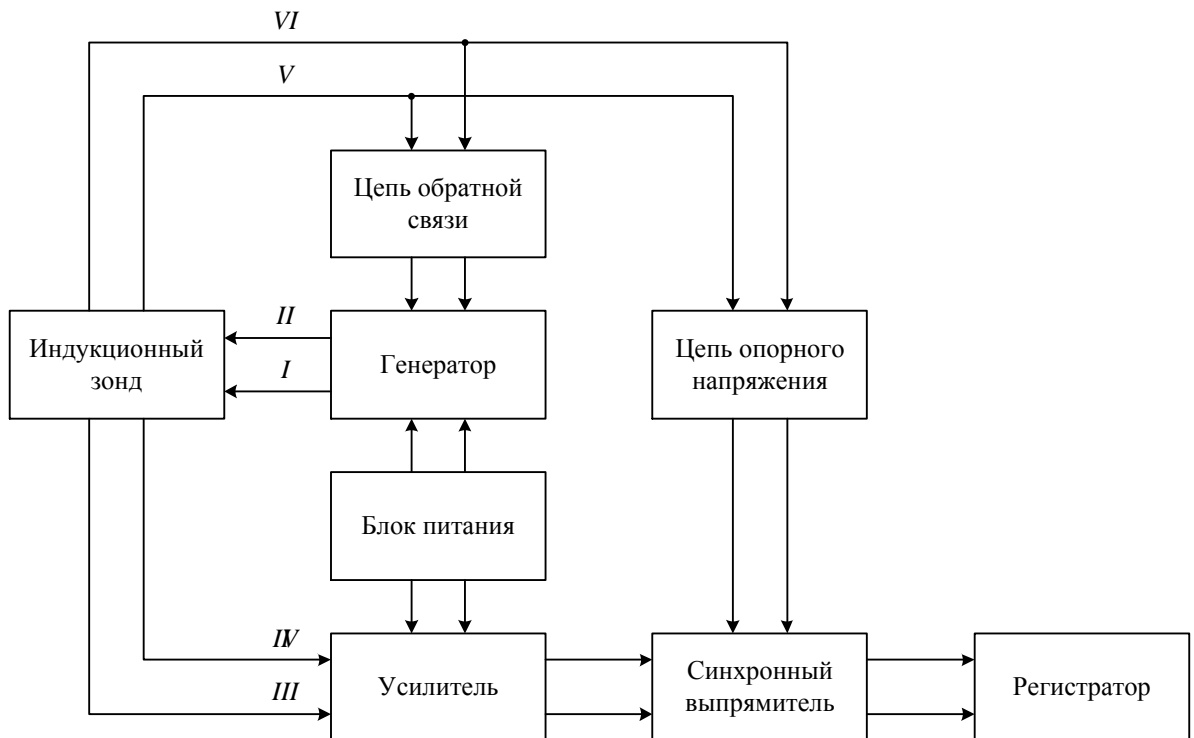
На железорудных карьерах Урала и Казахстана в настоящее время применяются компактные феррометры для магнитного каротажа буровзрывных скважин. После проходки скважины в нее спускается подвесной феррометр для автоматической фиксации содержания железа по глубине скважины. Эти приборы позволяют существенно сократить химический анализ бурового шлама, заменив его индукционным количественным каротажом [15].

В основе устройств для индукционных измерений магнитной восприимчивости лежит типовая структурная схема, которая в упрощенном виде представленная на рисунке 1.2, а. Индукционный зонд является преобразователем зна-

чений магнитной восприимчивости исследуемой среды в электрический сигнал. Питание генераторной катушки зонда низкочастотным током осуществляется по проводам *I* и *II* от генератора синусоидального напряжения.



a



б

Рисунок 1.2 – Структурные схемы индукционных устройств для измерения магнитной восприимчивости

a – без отрицательной обратной связи; *б* – с отрицательной обратной связью

В схемах таких устройств электрический сигнал с первого выхода зонда по проводам *III* и *IV* поступает на усилитель, затем на синхронный выпрямитель и регистратор. Со второго выхода зонда по проводам *V* и *VI* в цепь опорного напряжения поступает напряжение, пропорциональное ЭДС первичного поля и магнитному моменту генераторной катушки, служащее для питания синхронного выпрямителя. Тем самым предотвращается рассогласование по фазе между сигналом и опорным напряжением при воздействии на зонд внешней среды и изменяющейся температуры, что позволяет увеличить фазовую избирательность и точность измерений. В структурную схему также входит блок питания.

Для стабилизации магнитного момента генераторной катушки добротность генераторной цепи выбирают такой, чтобы получить минимальное отношение отклонения магнитного момента к вызвавшему его вносимому сопротивлению. Такой способ эффективен только в случае сильномагнитных сред, однако при хорошо проводящих рудах точность стабилизации ухудшается. От этого недостатка свободен общий способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки, представленный на второй структурной схеме (рис. 1.2, б). Она отличается от предыдущей схемы наличием цепи отрицательной обратной связи, служащей для стабилизации напряжения, подающегося со второго выхода зонда к управляющему входу генератора. В итоге стабилизируется напряжение, действующее между проводами *V* и *VI* и пропорциональное магнитному моменту, поэтому стабилизируется и амплитуда магнитного момента.

Высокая точность измерений индукционным методом достигается при правильной градуировке приборов, учитывающей все влияющие на проведение анализа факторы, а также при постоянном контроле стабильности работы приборов по эталонным образцам, поверкой измерительной аппаратуры и минералогическим контролем с применением химических методов анализа.

Достоинством метода является оперативность контроля массовой доли железа, низкая стоимость анализа, а его недостатком считается относительно низкая точность измерения по сравнению с методами химического анализа и применение только для материалов, содержащих ферромагнитные компоненты.

1.4 Анализ метрологических характеристик средств контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

Основным показателем качества продуктов магнитной сепарации и железорудного концентрата является относительное значение массовой доли железа, которое должно находиться в пределах технологических допусков. В настоящее время отсутствуют простые и надежные системы автоматического контроля массовой доли железа, способные работать в условиях горно-обогатительных комбинатов, а также отсутствуют научно обоснованные требования к диапазону и точности оценки качества продуктов обогащения, которые должны учитывать особенности минералогического состава железных руд [16].

В результате проведенного анализа существующих устройств и систем контроля массовой доли железа в магнетитовых рудах установлено следующее.

Достижение высоких технико-экономических показателей при добыче руды и производстве железорудного концентрата в значительной мере зависит от качества приборов автоматического контроля основных параметров технологического процесса: массовых долей железа в руде и продуктах обогащения, извлечения железа из рудной массы и выхода концентрата [16, 19].

Известные технические средства используют принцип измерения взаимной магнитной индукции между двумя катушками индуктивности, расположенными на фиксированном расстоянии в конструкции измерительного зонда.

Рассмотрим основные свойства наиболее широко применяемых приборов.

1.4.1 Рудничный измеритель магнитного влияния среды РИМВ-3

Аппаратура РИМВ-3 предназначена для геофизических исследований с целью выделения рудных интервалов и оценки качества магнетитовых руд при измерениях в скважинах на стенках горных выработок, рудной массы в навалах, вагонетках и самосвалах, а также при исследовании порошковых проб [20]. Применение аппаратуры РИМВ-3 дает возможность контролировать весь про-

цесс технологического цикла горнорудных предприятий в условиях как открытой, так и подземной отработки месторождений.

Структурная схема аппаратуры РИВМ-3 представлена на рисунке 1.3.

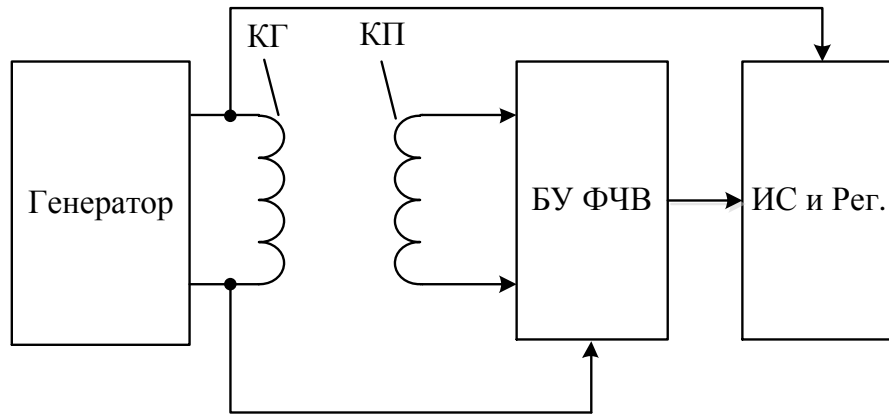


Рисунок 1.3 – Структурная схема аппаратуры РИВМ-3

БУ ФЧВ – блок усиления и фазочувствительного выпрямления; ИС и Рег. – измерительная схема и регистратор; КГ – катушка генераторная; КП – катушка приемная

Работа данного прибора основана на возбуждении электромагнитного поля в объеме исследуемого пространства и измерении относительного изменения магнитной составляющей напряженности этого поля в зависимости от изменения магнитных свойств исследуемой среды.

Возбуждение электромагнитного поля и измерение его напряженности производится с помощью индукционного преобразователя, генераторная катушка которого подключена к источнику низкочастотного напряжения, а измерительная катушка – к вторичному электронному преобразователю. За счёт индуктивной связи в измерительной катушке наводится ЭДС, значение которой максимально при расположении индукционного преобразователя (зонда) в немагнитной и непроводящей среде (в воздухе). В магнитной среде значение ЭДС уменьшается с увеличением магнитной восприимчивости горных пород и руд. Приращение ЭДС генераторной и измерительной катушек зонда зависит от содержания магнитного компонента в породе или руде и выделяется с помощью усилителя и фазочувствительного выпрямителя (рис. 1.3).

Аппаратура РИМВ-3 представляет собой набор измерительных устройств (УИС-1000, УИС-500, УСН-500 или УИПП) с общим блоком измерения (БИ). Питание аппаратуры осуществляется от шахтного аккумулятора или сетевого блока питания (БПС). Соединение составных частей аппаратуры РИМВ-3 осуществляется с помощью кабелей. Измерительные устройства содержат индукционные зонды различных конструкций. В измерительных устройствах УИС-500, УИС-1000 и УСН-500 применены некомпенсированные двухкатушечные зонды с расстоянием между центрами соосных катушек (длиной зонда) соответственно 500, 1000 и 500 мм, а в УИПП – трехкатушечный зонд с компенсацией ЭДС первичного поля. Возбуждающие катушки зондов питаются от генератора измерительного блока (БИ). Сигнал с измерительных катушек зонда поступает на усилитель скважинного прибора либо на входное устройство БИ [20].

Устройство исследования скважин (УИС-500) предназначено для исследования скважин диаметром от 46 до 150 мм.

Устройство исследования скважин (УИС-1000) предназначено для исследования скважин диаметром от 150 до 380 мм.

Устройство исследования стенок и навалов (УСН-500) предназначено для исследования стенок и навалов.

Устройство исследования порошковых проб (УИПП) предназначено для исследования порошковых проб руды и продуктов её переработки [20].

Блок измерительный (БИ) обеспечивает:

- запись служебной информации – этикетки (№ скважины, дата и др.);
- запись измеряемого сигнала;
- вычисление и запись среднего значения по выборке;
- хранение информации в памяти не менее 7 суток;
- просмотр записываемой информации на цифровом индикаторе;
- вывод данных через интерфейс "RS-232C" на ПЭВМ;
- контроль напряжения источника питания (аккумулятора);
- выход на аналоговый регистратор;
- возможность дистанционного включения режима измерения.

Для визуального отображения цифровой информации измерительный блок содержит пять семисегментных светодиодных индикаторов, отображающих измеряемый параметр и служебные символы.

Блок питания сетевой (БПС) служит для питания аппаратуры от промышленной сети переменного тока частотой (50 ± 1) Гц и напряжениям (220 ± 22) В или (36 ± 4) В. БПС также используется для зарядки аккумуляторов.

Скважинный прибор соединён с измерительным блоком трёхжильным каротажным кабелем длиной от 50 м до 300 м.

Методика контроля массовой доли железа в магнетитовой руде аппаратурой РИВМ-3 заключается в создании электромагнитного поля в исследуемой среде и измерения относительного приращения напряженности K магнитной составляющей поля. Это приращение связано с изменением магнитных свойств исследуемой среды относительно напряжённости магнитного поля, измеренной в немагнитной и непроводящей среде (в воздухе) [20, 21]:

$$K = \Delta H / H_0 = \Delta U / U_0, \quad (1.1)$$

где ΔH – приращение напряженности магнитной составляющей поля;

H_0 – напряженность магнитной составляющей поля в воздухе;

U_0 – реактивная составляющая напряжения на измерительной катушке индукционного преобразователя в воздухе;

$\Delta U = U_0 - U$ – приращение реактивной составляющей напряжения на измерительной катушке;

U – реактивная составляющая напряжения на измерительной катушке индукционного преобразователя в исследуемой среде.

Относительное приращение K в формуле (1.1) пропорционально кажущейся магнитной восприимчивости χ' исследуемой среды, нелинейно зависящей от содержания железа в руде, причем конкретное значение K зависит от типа или конструкции применяемого устройства исследования скважин.

Относительное приращение K в зависимости от используемого преобразователя рассчитывается следующим образом:

– при измерении магнитных свойств исследуемой среды с преобразователями УИС-500, УИС-1000 и УСН-500 используется формула

$$K = (n_0 - n)/n_0, \quad (1.2)$$

где n – показания измерительного блока при измерении в исследуемой среде;
 $n_0 = 1000$ – отсчёт по табло измерительного блока при измерении в воздухе;
 – при измерении магнитных свойств исследуемой среды с преобразователем типа УИПП приращение вычисляется по формуле

$$K = n/1000, \quad (1.3)$$

где n – показания измерительного блока.

Отсчёты n и n_0 , входящие в выражение (1.2), пропорциональны соответственно величинам U и U_0 формулы (1.1), а отсчёты n выражения (1.3) пропорциональны величине ΔU формулы (1.1).

Диапазоны измерений относительного приращения K разбиты на два поддиапазона в соответствии с данными таблицы 1.2, здесь же приведены значения отсчётов n на границах поддиапазонов измерения.

Таблица 1.1 – Предельные значения измерений относительного приращения K

Наименование измерительного устройства	Номер поддиапазона	Предельные значения			
		параметра K		отсчета n	
		от	до	от	до
УИПП	1	10^{-3}	10^{-1}	1	99,9
	2	10^{-1}	1	100	1000
УИС-500, УИС-1000, УСН-500	2	0	0,9	1000	100
	1	0,9	1	99,9	0

Основная погрешность измерения параметра K не превышает значения

$$\delta = \pm \left[5 + 0,5 \left(\frac{K_{\text{пр}}}{K_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%, \quad (1.4)$$

где $K_{\text{пр}}$ – предел поддиапазона измерений;

$K_{\text{изм}}$ – измеренная величина.

Дополнительная погрешность измерения относительного приращения K , вызванная отклонением температуры окружающей среды от допустимой, не превышает 0,8 основной погрешности на каждые 10°C. Основные технические характеристики аппаратуры РИВМ-3 в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные технические характеристики аппаратуры РИВМ-3

Наименование параметра	Показатель
1. Предельные значения параметра K	$10^{-5} \dots 1$
2. Основная погрешность измерения, %	$\delta \leq \pm 5$
3. Средняя наработка на отказ не менее, ч	1500
4. Питание прибора осуществляется: – от промышленной сети переменного тока, В – от источника постоянного тока, В	220 ± 22 36 ± 4
5. Потребляемая мощность не более, Вт	10
6. Время непрерывной работы прибора не менее, ч	6
7. Время установления рабочего режима не превышает, мин.	15
8. Средний срок службы, лет	6
9. Средний ресурс не менее, ч	5000
10. Габаритные размеры аппаратуры, мм: – измерительный блок; – сетевой блок питания; – УСН-500	$260 \times 92 \times 250$ $260 \times 190 \times 130$ $638 \times 620 \times 105$
11. Масса аппаратуры в комплектации измерительного блока, сетевого блока питания и УСН-500, кг	8,5
12. Условия эксплуатации: – температура окружающего воздуха при использовании скважных приборов УИС-500, УИС-1000, °С – температура окружающего воздуха для измерительного блока и устройства УСН-500, °С	минус 10 ÷ + 40 минус 20 ÷ + 40

1.4.2 Полевой измеритель магнитной восприимчивости ПИМВ-М

Полевой измеритель магнитной восприимчивости ПИМВ-М предназначен для измерения кажущейся магнитной восприимчивости горных пород в полевых условиях в навалах, образцах, кернах буровых скважин [22].

Прибор используется при проведении геологического картирования, петромагнитных исследований и решает задачу дифференциации горных пород и руд по значению магнитной восприимчивости в диапазоне от 10^{-5} до 1.

Принцип действия дифференциального магнитного моста, лежащего в основе работы прибора, заключается в изменении магнитного сопротивления измерительной цепи в зависимости от свойств образца контролируемой породы и поясняется схемой, приведенной на рисунке 1.4.

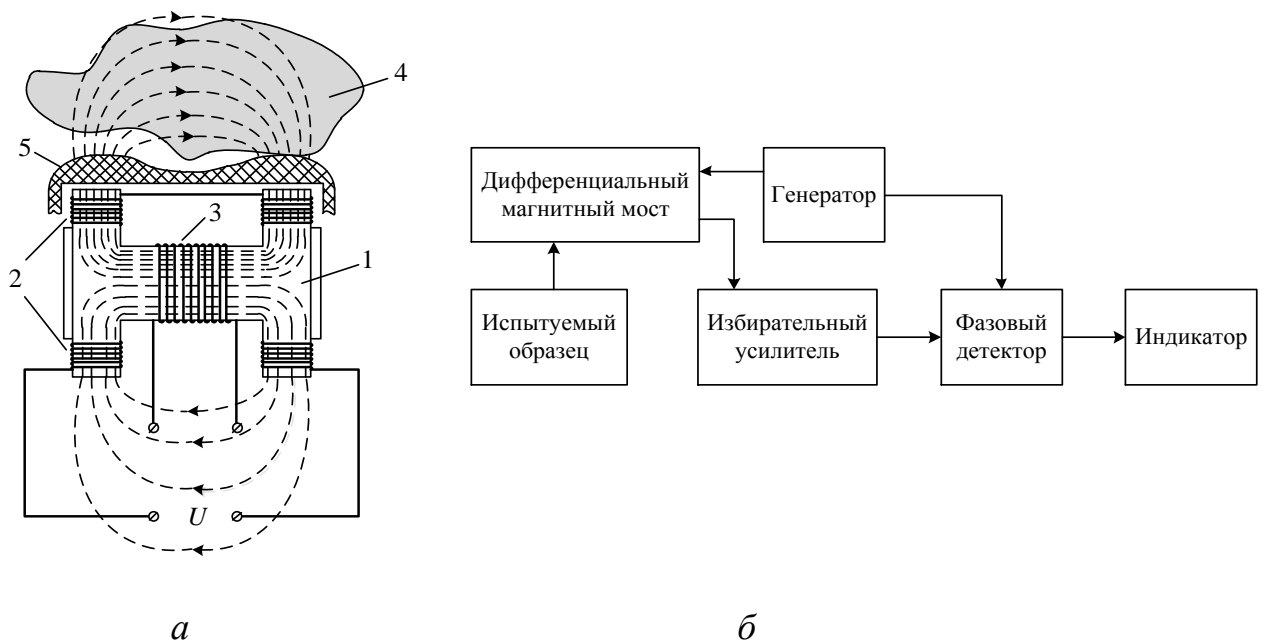


Рисунок 1.4 – Принцип действия дифференциального магнитного моста измерителя магнитной восприимчивости:

а – взаимодействие Н-образного сердечника с образцом породы;

б – структурная схема прибора ПИМВ-М

- 1 – Н-образный сердечник из листового пермаллоя, 2 – две пары одинаковых возбуждающих катушек, 3 – индикаторная индукционная катушка, 4 – образец контролируемой породы, 5 – пластмассовый корпус

Если расположить на концах Н-образного сердечника из листового пермаллоя две пары одинаковых возбуждающих катушек, питаемых током I различного направления, то в индикаторной индукционной катушке, находящейся на перемычке магнитопровода, магнитный поток будет практически отсутствовать. При замыкании верхних концов магнитопровода образцом породы магнитный поток, созданный верхними катушками, изменяется в соответствии с магнитной восприимчивостью χ образца породы.

В основу работы прибора положен частотный способ измерения магнитной восприимчивости. В качестве первичного измерительного преобразователя используется плоская индукционная катушка, расположенная на торцевой рабочей поверхности корпуса прибора, которая является частотоподающим элементом генератора низкой частоты. Частота генератора составляет около 5 кГц. Прибор измеряет частоту колебаний генератора при размещении первичного преобразователя "в воздухе" (при удалении от исследуемого образца или горной породы) и при наличии магнитной среды, когда катушка измерительного преобразователя вплотную прикладывается к поверхности изучаемого образца.

Кажущуюся магнитную восприимчивость рассчитывают по формуле:

$$\chi' = hk[(F_0/F)^2 - 1], \quad (1.5)$$

где F_0 – частота колебаний "в воздухе";

F – частота в присутствии магнитной среды;

k – калибровочный коэффициент прибора;

h – коэффициент, определяемый пользователем.

Переход от значений кажущейся магнитной восприимчивости χ' к истинной (χ) при измерении на плоской поверхности полупространства реализуется по формуле [13, 22]:

$$\chi = \chi' / (1 - 0,5\chi'). \quad (1.6)$$

При значениях кажущейся магнитной восприимчивости $\chi' \leq 0,1$ можно считать, что она соответствует истинной восприимчивости образца $\chi' = \chi$.

При исследовании образцов керна измеряемое значение кажущейся магнитной восприимчивости χ' может быть приведено к данным плоскостных измерений введением поправок на диаметр применяемого керна.

При измерении образцов с неровной поверхностью влияние зазоров может быть исключено введением поправки на шероховатость поверхности.

При ограниченном объеме контролируемого образца, когда его размеры в плоскости измерений составляют менее диаметра катушки первичного измерительного преобразователя, перевод измеренных значений χ' в истинную магнитную восприимчивость χ не реализуется, и такие образцы измерять нельзя.

Прибор ПИМВ-М измеряет "кажущуюся" магнитную восприимчивость. В общем случае она отличается от истинной и зависит от размеров и геометрической формы измеряемой поверхности. Прибор откалиброван для идеализированных условий, когда измерительная катушка контактирует с абсолютно гладкой плоскостью, ограничивающей полупространство, представленное однородной изотропной магнитной средой с магнитной восприимчивостью χ .

Если рабочая поверхность прибора неплотно контактирует с исследуемой поверхностью, то измеряемая величина оказывается значительно ниже кажущейся магнитной восприимчивости контролируемой среды, что приводит к существенному увеличению погрешности и снижению достоверности контроля.

В таблице 1.3 показано влияние зазора между прибором и контролируемой средой на относительное значение магнитной восприимчивости [22].

Кроме того, на измеряемую величину оказывают влияние шероховатости (неровности) поверхности образца. Величина неровности поверхности определяется как разность "выступ-углубление", т. е. расстоянием между верхней точкой наибольшего выступа и низшей точкой максимального углубления на площадке, по которой рабочая поверхность прибора контактирует с контролируемой средой в процессе измерений. Практически неровности оцениваются путем наблюдения зазора между измеряемой поверхностью и рабочей поверхностью прибора.

Таблица 1.3 – Влияние зазора между прибором и средой на относительное значение магнитной восприимчивости

Величина зазора между прибором и средой, мм	Относительное значение магнитной восприимчивости, (%)
0	100
5	42
10	19
15	10

В таблице 1.4 приведены поправки на неровности поверхности величиной до 10 мм. Исправленное значение может быть получено путем умножения измеренного значения на соответствующий поправочный коэффициент [22].

Таблица 1.4 – Влияние величины неровности на поправочный коэффициент

Величина неровности, (мм)	Поправочный коэффициент
1	1,07
2	1,15
3	1,23
4	1,32
5	1,41
6	1,51
7	1,61
8	1,72
9	1,84
10	1,96

При измерениях на поверхности с диаметром вписанной окружности меньше 60 мм необходимо учитывать поправки на конечные размеры площади (таблица 1.5). Измеренные значения следует умножать на соответствующий поправочный коэффициент.

При измерениях на обнажениях необходимо учитывать степень выветривания, которая значительно влияет на результаты исследований. Эффект выветривания с трудом поддается учету, поэтому предпочтительнее проводить измерения на не выветренной хотя и более неровной поверхности.

Таблица 1.5 – Влияние размера исследуемого образца на поправочный коэффициент

Размер образца, мм	Поправочный коэффициент
60	1,19
70	1,10
80	1,05
90	1,03
100	1,01

Для каждого измерения необходимо оценивать неровности поверхности и вводить соответствующие поправки, приведенные в таблице 1.4, причем нецелесообразно производить измерения на поверхности с неровностями более 5 мм.

Также не рекомендуется проводить измерения образцов толщиной менее 50 мм и с горизонтальными размерами, меньшими диаметра рабочей поверхности прибора (60 мм). Если диаметр круга, аппроксимирующего поверхность измерения, меньше 100 мм, то необходимо в полученные данные вводить поправку в соответствии с таблицей 1.5, а перед этим – поправку на неровности согласно таблице 1.4, что приводит, в итоге, к увеличению сложности контроля.

Прибор типа ПИМВ-М имеет следующие режимы работы:

- измерение без записи в память;
- измерение с записью в память;
- непрерывное измерение без записи в память;
- запись метки;
- просмотр памяти;
- изменение параметров: номера метки, коэффициента h , начального адреса записи;
- вывод содержимого памяти на внешнее устройство.

Наличие различных режимов работы позволяет повысить универсальность применения прибора и выполнять усреднение результатов контроля.

Основные технические характеристики прибора ПИМВ-М представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Основные технические характеристики прибора ПИМВ-М

Наименование параметра	Показатель
1. Диапазон измерения кажущейся магнитной восприимчивости χ' , ед. СИ	$1 \cdot 10^{-5} \dots 1$
2. Относительная погрешность измерения в диапазоне ($10^{-4} \dots 1$) ед. СИ, %	$\delta \leq \pm 10$
3. Объем внутренней энергонезависимой памяти, отсчетов	1000
4. Питание прибора осуществляется от 4-х батарей типа "AAA", В	6
5. Потребляемая мощность при напряжении питания 5 В составляет, Вт: – в статическом режиме – в режиме непрерывного измерения	0,025 0,05
6. Время непрерывной работы прибора не менее, ч	6
7. Время установления рабочего режима не более, мин.	5
8. Интерфейс для передачи измеренных значений во внешние устройства	RS-232C
9. Габаритные размеры прибора, мм	75 × 215
10. Масса прибора в чехле, кг	0,8
11. Условия эксплуатации: – температура окружающего воздуха, °С – влажность при $t = 30$ °С, не более, %	-10 ÷ + 50 90

1.4.3 Прибор магнитного опробования МКС-4В

Прибор магнитного опробования типа МКС-4В предназначен для ручного экспрессного опробования качества железной руды в шахтных вагонетках, думпкарах, для опробования насыпных конусов, для контроля руды в забое, а также стенок горных выработок и горной массы в навалах при подземной и открытой добыче в широком диапазоне изменения температуры и влажности [23].

Прибор МКС-4В выпускается в следующей базовой комплектации:

– блок преобразования информации (пульт) БИ-029, в котором имеется функция часов реального времени и возможность подключения приемника GPS, что позволяет круглосуточно и при любых погодных условиях определять координаты проведения работ;

– зондовое устройство УЗ-042 для проведения опробования на стационарных объектах (промпродуктовые конуса, стенки забоя, остановленное транспортное средство и т. п.).

Принцип действия прибора МКС-4В заключается в измерении магнитной восприимчивости железорудных материалов индукционным методом с помощью ручного зонда.

Прибор типа МКС-4В с навигатором GPS позволяет проводить повторное опробование блока после взрыва и выбирать направление для выемки руды.

Для определения величины массовой доли магнетитового железа по каждому типу руды должны быть построены градуировочные характеристики (корреляционные уравнения) между показаниями устройства в относительных единицах, пропорциональных магнитной восприимчивости, и содержанием железа, определяемого методом химического анализа, либо весовым методом. Получаемые уравнения связи вводятся в память микропроцессорного контроллера прибора через встроенную клавиатуру.

Зондовое устройство УЗ-042 предназначено для опробования на стенках забоя, на промпродуктовых конусах, в остановленных транспортных средствах и т. п. Такое зондовое устройство имеет три режима ("Измерение", "Среднее" и "Калибровка"), которые позволяют сделать процесс контроля массовой доли железа более точным (приближает замеры к плоскому полупространству). Это дает возможность исключать заведомо неправильные измерения.

Для связи с компьютером и самопишущим устройством прибор снабжен интерфейсом RS-232. Взаимодействие ЭВМ с прибором происходит путем системы команд, указанной в руководстве по эксплуатации. Данные команды можно посылать как через специализированную программу для работы с прибором, так и любыми другими терминальными программами, в том числе входящими в состав операционных систем *Windows* (например, *Hyper Terminal*).

Конструкция зондового устройства типа УЗ-042 состоит из Y-образного дюралюминиевого шасси, собранного из трубы диаметром 35 мм. На коротких концах труб закреплены приемная и генераторная катушки индуктивности, закрытые пластмассовыми защитными кожухами.

В процессе измерения на неровной поверхности образца иногда возникает субъективная погрешность, обусловленная неправильным размещением зонда

(его катушки могут "повиснуть" в воздухе). Оператор при измерении имеет возможность обеспечить текущий контроль достоверности опробования по показаниям прибора. Поскольку измерения производятся непрерывно, то оператор должен отслеживать отсчет до его фиксации и, если показания прибора не соответствуют предполагаемым значениям, то эти показания не учитываются. Каждый достоверный замер фиксируется нажатием кнопки "Измерение", а усреднение полученных результатов выполняется нажатием кнопки "Среднее".

В таблице 1.7 приведены основные технические характеристики прибора.

Таблица 1.7 – Основные технические характеристики прибора МКС-4В

Наименование параметра	Показатель
1. Расстояние между центрами катушек зонда, мм	500
2. Глубина намагничивания, мм	500
3. Объем намагничивания рудной массы, м ³	0,1
4. Диапазон измерения относительных приращений напряженности магнитной составляющей электромагнитного поля	0,001 ÷ 1,0
5. Время единичного измерения, с	0,25
6. Время выполнения точных измерений, с	1,0
7. Относительная приведенная погрешность измерения магнитной восприимчивости не более, %	3
8. Габаритные размеры пульта, мм	270×145×96
9. Масса пульта с аккумулятором, не более, кг	3,3
10. Габаритные размеры зонда У3042, мм	620×800×70
11. Масса зонда У3042, кг, не более	1,9
12. Аналоговый выход	да
13. Диапазон тока на аналоговом выходе, мкА	0 ÷ 200
14. Возможность подключения <i>GPS</i> -терминала для привязки измерений к географическим координатам	да
15. Запись результатов измерений на карту памяти <i>SD</i>	да
16. Запись результатов измерений на компьютер по интерфейсу стандарта <i>RS-232</i>	да
17. Часы реального времени	да
18. Потребляемая мощность, не более, ВА	4,2
19. Питание от аккумуляторной батареи напряжением, В	12
20. Продолжительность работы от полностью заряженного аккумулятора емкостью 2,3 А/ч, не менее, часов	6
21. Средняя наработка на отказ, не менее, час	5000
22. Условия эксплуатации:	
– температура окружающего воздуха, °С	–20 ÷ +40
– влажность при температуре $T = 25$ °С, не более, %	90

1.4.4 Измеритель магнитной восприимчивости *Bartington MS2/MS3*

Измеритель магнитной восприимчивости типа *Bartington MS2/MS3* предназначен для измерения магнитной восприимчивости различных типов сред, таких как почва, камень, порошки и жидкости [24]. Устройство применяется в полевых и лабораторных условиях.

Система типа *MS2/MS3* представляет собой электронный блок с набором датчиков, что позволяет использовать его для выполнения:

- геологических и почвенных изысканий;
- палеомагнитных исследований;
- археологических поисковых работ;
- документирования и изучения корреляции кернов;
- определения источников почвенных загрязнений;
- исследования ферритов и магнитных чернил;
- изучения магнитных частиц микроразмеров и магнитных жидкостей.

Программное обеспечение позволяет интегрировать систему с компьютером, ноутбуком или мобильным *GPS/PDA*-устройством.

Принцип работы заключается в создании вокруг датчика низкочастотного магнитного поля небольшой интенсивности и измерении вблизи датчика приращения напряженности поля при контроле исследуемого образца. Значение напряженности регистрируется электронным блоком и пересчитывается в значение магнитной восприимчивости. Устройство позволяет измерять как парамагнитные, так и диамагнитные ($\chi' < 0$) образцы с разрешением $2 \cdot 10^{-6}$. Исследования являются неразрушающими, т. е. не изменяют магнитные свойства образца.

Благодаря низкой рабочей частоте прибора минимизировано влияние проводимости контролируемой среды на результат измерения. Применяемые в приборе датчики термокомпенсированы и имеют малый температурный дрейф.

Измеритель магнитной восприимчивости *MS2* – это портативный прибор с 4-разрядным цифровым дисплеем, способный работать со всеми типами датчиков серии *MS2* [24]. На передней панели прибора расположены: цифровой дис-

плей, переключатель диапазона чувствительности, кнопки "Установка нуля" и "Измерение", а также разъём для подключения датчика. Для связи с компьютером используется последовательный интерфейс RS-232. Встроенный аккумулятор может заряжаться через сетевой адаптер или от бортовой сети автомобиля. Имеются индикаторы зарядки и уровня заряда аккумулятора. Все органы управления и разъёмы защищены от атмосферных воздействий.

Компактный прибор-измеритель магнитной восприимчивости *MS3* характеризуется повышенной производительностью [24]. Верхний предел измерений составляет 26 единиц СИ (по сравнению с 0,1 для *MS2*) при минимальной длительности цикла измерения 0,1 с. Данная модель прибора обеспечивает различные настройки и, кроме того, позволяет сохранять *GPS*-метки проведённых замеров (при подключении к *GPS/PDA* портативным устройствам).

Прибор типа *MS3* является *USB*-устройством и требует наличия персонального компьютера для управления и вывода результатов (ноутбука, планшетного компьютера или мобильного телефона, способного работать в качестве *USB*-хоста). Необходимое программное обеспечение (*Bartsoft*), входящее в комплект поставки и устанавливаемое на ПЭВМ, позволяет реализовать:

- настраиваемый интервал измерения, благодаря которому, общее время измерения в серии можно сократить до двух раз по сравнению с прибором *MS2*;
- выбор схемы измерения для частичной автоматизации процесса, включая предустановки для характерных задач контроля: выполнение одиночных измерений, документирование керна, двухкоординатный X-Y скрининг и т. д.;
- вывод результатов измерений в табличном и графическом формате;
- автоматический пересчёт удельных величин в зависимости от объёма, массы образца и температурного дрейфа;
- хранение полученных данных в собственном формате *Bartsoft* или копирование в электронную таблицу.

Доступные версии программного обеспечения *Bartsoft* для ОС *Windows* (2000/*XP/Vista/Windows 7* (32 и 64 разряда) и для *Windows CE* (*Windows Mobile 6*, с поддержкой *GPS* и протоколированием *GPS*-координат в процессе измерения).

Основные технические характеристики приборов *MS2/MS3* представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Основные технические характеристики приборов *MS2* и *MS3*

Технические характеристики	<i>MS2</i>	<i>MS3</i>
Верхний предел измерения	0,09999 СИ (объем)	26 СИ (объем)
Предельное разрешение	$2 \cdot 10^{-6}$ СИ	$2 \cdot 10^{-6}$ СИ
Единицы измерения	СИ, СГС	СИ, СГС
Время измерения, с	1,1 или 11	от 0,1
Дисплей	да	нет (требуется подключение к ПЭВМ)
Сохранение результатов: – в лаборатории – в полевых условиях	да (<i>Bartsoft</i> или <i>Multisus</i>) нет	да (<i>Bartsoft</i>) да (<i>Bartsoft</i> для <i>Windows CE</i>)
Масса, кг	1,9	0,13
Аккумулятор: – тип – время непрерывной работы, ч – время зарядки, ч	<i>Ni-Mn</i> , 0,7 А·ч 8 16	–
Рабочая температура, °С	минус 10 ... +40	минус 10 ... +40
Габаритные размеры, мм	260×158×50	118×50×30

Рабочий комплект цифрового устройства состоит из электронного блока (*MS3* или *MS2*) и одного или более датчиков.

Датчик типа *MS2B* предназначен для измерения магнитной восприимчивости почв, камня и осадочных пород. При использовании специального адаптера для образцов и программного обеспечения *AMSWIN-BAR* он может применяться также для определения анизотропии магнитной восприимчивости скальных пород, магнитных жидкостей, чернил и порошков микро- и наночастиц.

Уникальный двухчастотный метод позволяет регистрировать магнитные образования вблизи перехода "парамагнетик/стабильный домен".

Датчик позволяет работать с образцами размеров: 25,4 мм³ и 23 мм³, 35 мм тороидальные и 25,4 мм цилиндрические керны. В комплекте поставки имеется эталонный образец с малой температурной и частотной зависимостью.

Точность калибровки датчика типа *MS2B* составляет 1 %, рабочая частота низкая – $0,465 \text{ кГц} \pm 1 \%$, высокая – $4,65 \text{ кГц} \pm 1 \%$, формируемая магнитная индукция составляет $250 \text{ мТ} \pm 10 \%$ как на низкой, так и на высокой частоте.

Датчик *MS2C* предназначен для измерения объёмной восприимчивости в кернах сплошного отбора диаметром от 30 до 162 мм и может использоваться при изучении торфяных, озёрных и морских отложений, не имеющих побочной металлизации и при геологоразведочных работах. Набор калибровочных кривых для разных диаметров датчика поставляется совместно с прибором.

Наименьшая погрешность датчика составляет 5 % и достигается при зазоре между керном и датчиком от 5 до 10 мм. Рабочая частота – $0,565 \text{ кГц}$.

Поверхностный кольцевой датчик *MS2D* предназначен для оценки состава магнитного материала в толще породы до 10 см при рабочей частоте $0,958 \text{ кГц}$.

Точечный поверхностный датчик *MS2F* применяется при контроле неровной поверхности, не позволяющей использовать кольцевой датчик *MS2D*. Время измерения находится в пределах от 1,1 до 11 с, рабочая частота – $0,58 \text{ кГц}$.

Поверхностный датчик *MS2K* предназначен для измерения объёмной магнитной восприимчивости ровных поверхностей и применяется при магнитной идентификации горизонтов. Он может быть использован при работе в местах выхода породы и при картировании керновых срезов. Благодаря низкой рабочей частоте ($0,93 \text{ кГц}$) датчик применим также на немагнитных сплавах с умеренной проводимостью (например, для контроля нержавеющей стали). Время измерения находится в пределах от 1,2 до 12 с.

Сравнение технических характеристик существующей аппаратуры контроля массовой доли железа в рудной массе показывает, что индукционные датчики позволяют обеспечить минимальную погрешность измерения порядка 3–10 % только при стабильной величине зазора между зондом и контролируемой средой. При этом для дальнейшего улучшения параметров аппаратуры, служащей для количественного контроля состава руды, необходимы дополнительные исследования, обеспечивающие повышение чувствительности датчиков и компенсацию влияния величины зазора между зондом и поверхностью контролируемой среды на точность измерения.

1.5 Выводы по первой главе

1. Магнетит является основным минералом железорудных месторождений. При подготовке к дальнейшей переработке магнетитовой руды проводится оценка ее технологических свойств и контролируется массовая доля магнетита в рудной массе. Содержание железа и его соединений в магнетитовых рудах колеблется от 19 до 72 %. Знание количественного состава магнетитовых руд позволяет выбрать руды, пригодные для промышленного использования.

2. Определение массовой доли железа в исследуемой руде выполняется методами количественного анализа, которые подразделяются на три группы: химические, физические, физико-химические. Химические методы применяются в лабораторных условиях и являются эталонными, однако они во многих случаях не отвечают возросшим требованиям к оперативности и автоматизации процесса контроля, присущим физическим методам анализа магнетитовых руд.

3. Для количественного анализа материалов с ферромагнитными компонентами целесообразно использовать индукционный метод контроля, к достоинствам которого относятся оперативность проведения контроля массовой доли железа, низкая стоимость анализа и более низкие требования к квалификации обслуживающего персонала. Недостатком метода является относительно низкая точность измерения по сравнению с методами химического анализа.

4. Известные технические средства используют принцип измерения взаимной магнитной индукции между двумя катушками индуктивности, расположенными на фиксированном расстоянии в конструкции измерительного зонда. Приборы калибруют для идеализированных условий, когда измерительная катушка контактирует с гладкой плоскостью однородной магнитной среды. В процессе измерения неровной рудной поверхности возникает субъективная погрешность, обусловленная неправильным размещением зонда. В связи с этим рассмотренные средства измерения имеют общий недостаток, связанный с ограниченной точностью контроля, причем типовая погрешность измерения магнитных параметров в известных устройствах разного типа составляет не менее 3–10 %.

2 КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ МАГНЕТИТОВОГО ЖЕЛЕЗА В РУДАХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

2.1 Физические основы индукционных методов измерения магнитной восприимчивости

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. Однако индуцируемые в среде вихревые токи создают помеху при измерениях. Их воздействие обычно подавляется аппаратурными мерами: снижением частоты сигнала и его синхронным выпрямлением. При переменном поле в принципе можно ожидать и явления дисперсии магнитных свойств, так как эти свойства в значительной степени обусловлены присутствием ферромагнитных минералов в рудной массе [25]. Однако, лабораторными измерениями не выявлено частотной зависимости и не обнаружено вязкой компоненты проницаемости в диапазоне звуковых частот [26, 27]. Измеряемая магнитная восприимчивость имеет смысл обратимой восприимчивости, значение которой определяется наклоном петли частного гистерезисного цикла. Вследствие относительно низких значений первичного намагничивающего поля она близка к начальной восприимчивости, определяемой традиционным магнитометрическим методом.

В качестве простых устройств, преобразующих информацию о магнитной восприимчивости среды в электрический сигнал, на практике используют индукционный зонд с источником и приемником поля (рис. 2.1). Источником является генераторная катушка, создающая первичное электромагнитное поле в результате протекания синусоидального тока по ее обмотке. Приемником поля обычно служит приемная индукционная катушка, хотя, в принципе, можно использовать и активное устройство, например, феррозонд.

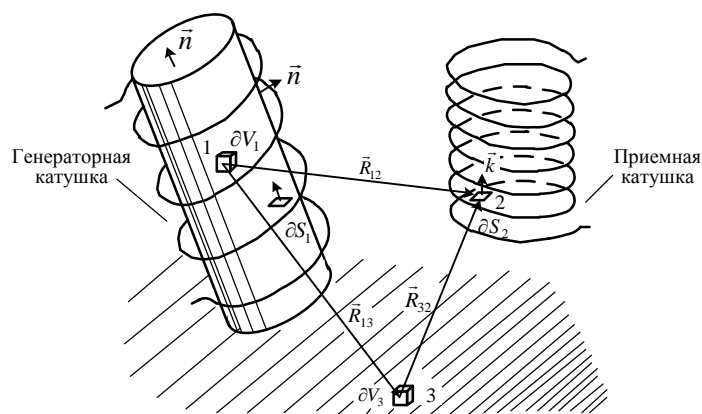


Рисунок 2.1 – Общий вид двухкатушечного индукционного зонда

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.

Иногда генераторная катушка совмещает функции источника и приемника сигнала и представляет собой однокатушечный зонд. В этом случае на приемник воздействует как первичное поле источника сигнала, так и вторичное поле намагничиваемой среды, которое зависит от магнитной восприимчивости контролируемого образца и приводит к изменению амплитуды сигнала, которое выделяется и используется в качестве информативного параметра. Такие однокатушечные зонды предназначены для выборочного контроля магнитной восприимчивости образцов с гладкой поверхностью и при минимальном зазоре между датчиком и исследуемым образцом.

Учитывая сложную взаимосвязь измеряемых сигналов с магнитной восприимчивостью контролируемой среды необходимо рассмотреть основные свойства магнитного поля и особенности расчета его параметров.

2.1.1 Структура измеряемого магнитного поля

Если пренебречь влиянием вихревых токов проводимости, то магнитное поле определяется дифференциальными уравнениями магнитостатики

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 0, \quad (2.2)$$

и граничными условиями на поверхностях раздела, на которых магнитные свойства среды изменяются скачкообразно (Рис. 2.1),

$$B_{1n} = B_{2n}; H_{1t} = H_{2t}, \quad (2.3)$$

где \vec{B} , \vec{H} – векторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля; B_{1n} , B_{2n} , H_{1t} , H_{2t} – нормальные и касательные проекции этих векторов по разные стороны поверхности раздела.

В отличие от магнитной индукции, которая является силовым вектором, напряженность магнитного поля носит несколько формальный характер (так же как и магнитные заряды). Для упрощения выкладок в уравнения поля обычно вводится вектор \vec{H} на основании определяющего равенства

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}), \quad (2.4)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;

\vec{J} – магнитный момент единицы объема (намагниченность) среды.

Для упрощения анализа в дальнейшем можно полагать, что в рассматриваемых средах уравнения связи между векторами \vec{J} и \vec{H} , \vec{B} и \vec{H} представляются линейными соотношениями [11]

$$\vec{J} = \chi \vec{H}; \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (2.6)$$

где χ – магнитная восприимчивость контролируемого вещества;

$\mu = 1 + \chi$ – его относительная магнитная проницаемость.

Одна из задач магнитостатики состоит в определении поля по заданной намагниченности тела. В этом случае удобно оперировать с вектором \vec{H} , поле которого, согласно формуле (2.2), является потенциальным:

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi. \quad (2.7)$$

Подставляя формулы (2.4) и (2.7) в соотношения (2.1) и (2.3), можно получить для магнитного потенциала φ уравнение Пуассона

$$\nabla^2 \varphi = \text{div} \vec{J} \quad (2.8)$$

при граничных условиях

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} - \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = J_n; \quad \varphi_1 = \varphi_2, \quad (2.9)$$

причем единичная нормаль \vec{n} проведена из магнитной среды 1 в немагнитную среду 2 (рис. 2.1).

Уравнение (2.8) характеризует влияние объемных магнитных зарядов с плотностью $-\text{div} \vec{J}$, а уравнение (2.9) – влияние поверхностных магнитных зарядов с плотностью J_n , образующих простой слой.

Учитывая вид решения уравнения Пуассона (2.8) и распространяя его и на случай простого слоя, можно выразить магнитный потенциал в виде (2.10)

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{-\operatorname{div} \vec{J}}{R} \partial V + \frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{J_n}{R} \partial S, \quad (2.10)$$

где V – объем намагниченного тела; S – ограничивающая его поверхность; R – расстояние от точки источника, по координатам которой проводится интегрирование, до точки наблюдения, от которой зависит магнитный потенциал φ .

В случае однородности тела по восприимчивости χ из уравнений (2.1), (2.5) и (2.6) вытекает, что $\operatorname{div} \vec{J} = 0$. Объемный интеграл при этом пропадает, и влияние намагниченного тела учитывается его поверхностными магнитными зарядами с плотностью

$$\omega_m = J_n. \quad (2.11)$$

Согласно [11], сумму (2.10) можно свести к одному объемному интегралу:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \cdot \vec{R}}{R^3} \partial V. \quad (2.12)$$

В отличие от формулы (2.10) здесь учтены потенциалы не элементарных магнитных зарядов, а магнитных диполей, распределенных с плотностью \vec{J} .

При индукционных измерениях магнитной восприимчивости источником поля является синусоидальный ток I , протекающий в витках генераторной катушки. Чтобы обеспечить однозначность потенциала, линейные контуры с током заменим опирающимися на них магнитными листками, на поверхности которых

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial k} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial k}; \quad \varphi_2 - \varphi_1 = I, \quad (2.13)$$

где \vec{k} – единичная нормаль, проведенная со стороны 1 в сторону 2 и согласованная с направлением тока правилом винта (рис. 2.1).

Соотношения (2.13) учитывают вклад дипольных магнитных зарядов, образующих двойной слой с плотностью $\vec{I}\vec{k}$. Распространяя формулу (2.12) на магнитные листки, можно найти потенциал токовой обмотки генераторной катушки

$$\varphi_{0I} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_{B1}} \frac{\vec{k} \cdot \vec{R}}{R^3} \partial S, \quad (2.14)$$

где S_{B1} – общая поверхность площадок, опирающихся на витки с током.

Потенциал первичного поля генераторной катушки помимо величины (2.14) должен включать также слагаемое, учитывающее в соответствии с формулой (2.12) влияние ферромагнитного сердечника катушки:

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{S_{B1}} \frac{\vec{k} \cdot \vec{R}_{12}}{R_{12}^3} \partial S_1 + \frac{1}{4\pi} \int_{V_{\Phi 1}} \frac{\vec{J}_{\Phi} \cdot \vec{R}_{12}}{R_{12}^3} \partial V_1, \quad (2.15)$$

где \vec{J}_{Φ} – намагниченность ферромагнитного сердечника; $V_{\Phi 1}$ – его объем; \vec{R}_{12} – вектор расстояния, проведенный из точки 1 источника в точку 2 (рис. 2.1).

Потенциал вторичного поля намагничиваемой исследуемой среды определяется формулой, аналогичной (2.12):

$$\varphi' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_3} \frac{\vec{J}' \cdot \vec{R}_{32}}{R_{32}^3} \partial V_3, \quad (2.16)$$

где \vec{J}' – намагниченность исследуемой среды; V_3 – ее объем; \vec{R}_{32} – вектор расстояния, проведенный из точки 3 среды в точку 2 наблюдения (рис. 2.1).

Общий потенциал напряженности поля представляется в виде суммы этих потенциалов

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi', \quad (2.17)$$

а напряженность поля складывается геометрически с учетом векторов:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}'. \quad (2.18)$$

Согласно формулам (2.7) и (2.15) – (2.17) напряженности первичного \vec{H}_0 и вторичного \vec{H}' поля соответственно равны:

$$\vec{H}_0 = \frac{1}{4\pi} \int_{S_{\text{Б1}}} \left[\frac{3(\vec{k} \cdot \vec{R}_{12})}{R_{12}^5} \vec{R}_{12} - \frac{\vec{k}}{R_{12}^3} \right] \partial S_1 + \frac{1}{4\pi} \int_{V_{\Phi 1}} \left[\frac{3(\vec{J}_{\Phi} \cdot \vec{R}_{12})}{R_{12}^5} \vec{R}_{12} - \frac{\vec{J}_{\Phi}}{R_{12}^3} \right] \partial V_1; \quad (2.19)$$

$$\vec{H}' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_3} \left[\frac{3(\vec{J}' \cdot \vec{R}_{32})}{R_{32}^5} \vec{R}_{32} - \frac{\vec{J}'}{R_{32}^3} \right] \partial V_3. \quad (2.20)$$

Интегралы (2.19) и (2.20) выражают суммирование полей элементарных магнитных диполей, сосредоточенных в объемах источника и исследуемой среды. Из формул (2.15) и (2.19) следует, что на расстояниях, значительно превосходящих линейные размеры генераторной катушки, ее поле в целом имеет дипольный характер и определяется выражениями:

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\vec{M} \cdot \vec{R}_{12}}{R_{12}^3}; \quad (2.21)$$

$$\vec{H}_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{R}_{12})}{R_{12}^5} \cdot \vec{R}_{12} - \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\vec{M}}{R_{12}^3}, \quad (2.22)$$

$$\vec{M} = IS_{\text{Б1}} \vec{k} + \int_{V_{\Phi 1}} \vec{J}_{\Phi} \partial V_1 \quad (2.23)$$

где \vec{M} – магнитный момент генераторной катушки.

Первое слагаемое в формуле (2.23) представляет собой магнитный момент токовой обмотки, а второе – магнитный момент сердечника.

Витки приемной катушки пронизываются магнитными потоками первичного поля

$$\Phi_0 = \mu_0 \int_{S_{B2}} H_{0k} \partial S_2 \quad (2.24)$$

и вторичного поля

$$\Phi' = \mu_0 \int_{S_{B2}} H'_k \partial S_2, \quad (2.25)$$

где H_{0k} и H'_k – проекции полей на ось приемной катушки; S_{B2} – общая поверхность, опирающаяся на витки приемной катушки.

При наличии в катушке ферромагнитного сердечника в формулы (2.24) и (2.25) следует ввести множитель – действующую магнитную проницаемость.

Суммарный магнитный поток $\Phi = \Phi_0 + \Phi'$ индуцирует в приемной катушке ЭДС $E = -\partial\Phi/\partial t$:

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

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

$$\Delta E/E_0 = \frac{\partial\Phi'/\partial t}{\partial\Phi_0/\partial t}, \quad (2.26)$$

которое не зависит от интенсивности первичного поля (магнитного момента M), а является функцией магнитной восприимчивости среды, параметров измерительного зонда и геометрических условий измерения.

Вторичное поле определяется намагниченностью \vec{J}' , которая в соответствии с формулой (2.5) зависит от суммарной напряженности поля в среде:

$$\vec{J}' = \chi(\vec{H}_0 + \vec{H}').$$

Подставляя это выражение в формулу (2.20), можно получить интегральное уравнение

$$\vec{H}' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_3} \chi \left[\frac{3(\vec{H}_0 + \vec{H}') \vec{R}_{32}}{R_{32}^5} \vec{R}_{32} - \frac{\vec{H}_0 + \vec{H}'}{R_{32}^3} \right] \partial V_3, \quad (2.27)$$

решить которое трудно даже при современных вычислительных средствах.

Явное выражение для поля \vec{H}' отсюда можно найти лишь в случае слабомагнитной среды, когда первичное поле существенно преобладает над вторичным ($|\vec{H}'| \ll |\vec{H}_0|$):

$$\vec{H}' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_3} \chi \left[\frac{3(\vec{H}_0 + \vec{R}_{32})}{R_{32}^5} \vec{R}_{32} - \frac{\vec{H}_0}{R_{32}^3} \right] \partial V_3. \quad (2.28)$$

Практически формула (2.28) получается из предыдущей (2.27) предельным переходом при $\chi \rightarrow 0$. Однако, ее можно использовать совместно с выражениями (2.19), (2.24) – (2.26) для приближенных расчетов отношения $\Delta E/E_0$, если в среде задано распределение $\chi \ll 1$.

Для обоснования методики измерений магнитной восприимчивости важное значение имеет случай однородной среды. Величину χ тогда можно вынести из-под знака интеграла (2.28) и получить линейную зависимость вторичной ЭДС от магнитной восприимчивости слабомагнитной среды:

$$\Delta E/E_0 = G\chi. \quad (2.29)$$

Безразмерный коэффициент пропорциональности G между отношением $\Delta E/E_0$ и величиной χ называют геометрическим фактором, поскольку он зависит, прежде всего, от геометрических условий измерения [11–13]. На значение фактора G при прочих равных условиях влияет способ питания генераторной катушки, который, например, может обеспечивать неизменность амплитуды магнитного момента M или силы тока I . Используя соответствующие индексы, в первом случае получим $G = G_M$, а во втором – $G = G_I$.

В формулы для параметров ΔE и E_0 входит одна и та же величина H_0 , что возможно при стабильности источников первичного поля и их интегральной характеристики M под воздействием исследуемой среды. На основании формул (2.24), (2.27) – (2.29) можно получить предельное значение фактора

$$G_M = \lim_{\chi \rightarrow 0} \frac{\Phi'}{\chi \Phi_0} \quad (2.30)$$

или

$$G_M = \frac{\mu_0}{4\pi\Phi_0} \int_{S_{B2}} \left\{ \int_{V_3} \left[\frac{3(\vec{H}_0 \cdot \vec{R}_{32})}{R_{32}^5} \vec{R}_{32} - \frac{\vec{H}_0}{R_{32}^3} \right]_k \partial V_3 \right\} \partial S_2. \quad (2.31)$$

При стабилизации амплитуды намагничивающего тока значение фактора $G = G_I$ отличается от расчетного G_M . В этом случае некомпенсированное намагничивание сердечника генераторной катушки полем \vec{H}' приведет к увеличению момента M и появлению дополнительного вторичного поля \vec{H}'' . Структура этого магнитного поля определяется вторым интегралом (2.19), если в нем основную намагниченность \vec{J}'_Φ , создаваемую переменным током, заменить намагниченностью \vec{J}'_Φ сердечника полем \vec{H}' :

$$\vec{H}'' = \frac{1}{4\pi} \int_{V_{\Phi 1}} \left[\frac{3(\vec{J}'_\Phi \cdot \vec{R}_{12})}{R_{12}^5} \vec{R}_{12} - \frac{\vec{J}'_\Phi}{R_{12}^3} \right] \partial V_1. \quad (2.32)$$

Это поле создает дополнительный поток через витки приемной катушки

$$\Phi'' = \mu_0 \int_{S_{B2}} H_k'' \partial S, \quad (2.33)$$

который изменяет приращение ΔE , а, следовательно, и геометрический фактор:

$$G_I = \lim_{\chi \rightarrow 0} \frac{\Phi' + \Phi''}{\chi \Phi_0}. \quad (2.34)$$

Появление дополнительного полезного сигнала от магнитного потока Φ'' можно объяснить тем, что для приемной катушки зонда сердечник генераторной катушки выполняет функцию магнитной антенны.

Ближайшая к генераторной катушке часть контролируемой среды всегда намагничивается так, что усиливает первичное поле в объеме этой катушки, увеличивая ее эквивалентную индуктивность. Следовательно, векторы \vec{J}_Φ и \vec{J}'_Φ направлены в одну сторону (углы между ними острые), а обусловленные ими в приемной катушке потоки Φ_0 и Φ'' имеют один знак. Поэтому согласно формулам (2.30) и (2.34) фактор $G_I > G_M$, однако при отсутствии сердечника $G_I = G_M$.

В объеме приемной катушки взаимная ориентация вторичного поля среды \vec{H}' и первичного поля источника \vec{H}_0 может отличаться в зависимости от конструкции зонда и его расположения относительно контролируемой среды. Также могут различаться направления проекций H'_k и H_{0k} этих полей на ось приемной катушки. Поэтому о знаках отношения магнитных потоков Φ'/Φ_0 и геометрического фактора G можно судить только после выполнения расчетов. Вторичное поле может увеличивать измеряемый магнитный поток ($\Phi > \Phi_0$) или уменьшать его ($\Phi < \Phi_0$). Соответственно различаются и конструкции зондов: с усилением магнитного потока, у которых геометрический фактор $G > 0$, или с ослаблением (экранированием) магнитного потока, у которых значение $G < 0$.

Отличие знака вторичного магнитного поля по отношению к первичному полю проявляется в виде фазового сдвига между ЭДС ΔE и E_0 . Измерительные зонды с усилением магнитного потока, у которых под воздействием намагничиваемой среды измеряемое поле увеличивается, имеют нулевой фазовый сдвиг. Зонды с ослаблением магнитного потока, измеряющие экранирующее влияние среды, характеризуются фазовым сдвигом 180° . Эти фазовые соотношения не зависят от частоты намагничивающего тока и сохраняются в предельном случае до нулевой частоты.

Особое место занимают зонды третьего типа – с нулевым измеряемым первичным полем, что может быть обеспечено, например, подбором определенной взаимной ориентации источника и приемника магнитного поля. Из-за отсутствия первичной ЭДС судить практически о знаке или фазе вторичного измеряемого поля невозможно. Следует отметить, что во всех случаях вторичное поле намагничиваемой среды имеет только реактивную составляющую: положительную для зондов первого типа и отрицательную для зондов второго типа. Для зондов третьего типа знак поля и геометрического фактора зонда становится определенным лишь после выбора в качестве ЭДС E_0 некоторой нормирующей (градуировочной) ЭДС.

При обсуждении структуры вторичного поля в контролируемой среде удобно основываться на формулах (2.10) и (2.11), согласно которым поле однородной по восприимчивости χ среды создается поверхностными магнитными зарядами с плотностью $\omega_m = \chi H_n$. Знак плотности ω_m и проекции H_n суммарного поля на внешнюю нормаль к поверхности среды совпадает со знаком аналогичной проекции H_{0n} первичного поля. Отсюда следует, что вблизи поверхности раздела и со стороны источника сигнала вторичное поле \vec{H}' усиливает проекцию H_{0n} и первичное поле в целом, а со стороны магнитной среды, наоборот, вектор \vec{H}' направлен навстречу полю \vec{H}_0 . В результате этого уменьшается намагниченность $\vec{J} = \chi(\vec{H}_0 + \vec{H}')$, что вызывает отклонение зависимости $\Delta E(\chi)$ от линейной, выражаемой формулой (2.29).

В магнитометрии влияние размагничивающего поля обычно учитывают с помощью коэффициента размагничивания. Его можно определить расчетным путем только для однородных образцов, ограниченных поверхностями второго порядка и находящихся в однородном поле. Аналогичным образом можно выразить размагничивающий эффект однородных сплошных сред с цилиндрической или плоской поверхностью раздела при их намагничивании первичным неоднородным полем с достаточно сложной структурой. Для указанных сред с произвольным значением χ формула (2.29) преобразуется к виду

$$\Delta E/E_0 = G\chi', \quad (2.35)$$

где χ' – кажущаяся магнитная восприимчивость.

При этом кажущаяся магнитная восприимчивость χ' определяется следующим выражением

$$\chi' = \chi/(1 + N\chi) \quad (2.36)$$

где N – коэффициент размагничивания.

Соотношение (2.35) показывает линейную зависимость вторичного поля от кажущейся магнитной восприимчивости. Геометрический фактор входит в нее как коэффициента пропорциональности, учитывающий влияние геометрических условий измерения: формы поверхности раздела, геометрических параметров зонда и его ориентировки относительно контролируемой поверхности. Геометрический фактор как функция от длины зонда представляет собой радиальную характеристику, особенно в контролируемой среде с малым значением χ . Зависимость фактора G от величины зазора между зондом и плоской поверхностью среды является его вертикальной характеристикой.

Коэффициент размагничивания N отражает нелинейную связь ЭДС ΔE с восприимчивостью χ , возникающую из-за собственного магнитного поля среды. Размагничивающее поле может быть объяснено действием магнитных полюсов, которые в среде, однородной по магнитной восприимчивости, располагаются

только по ее поверхности. Тем самым источники размагничивающего поля оказываются приближенными к участкам среды, наиболее влияющим на приращение ЭДС ΔE . Кроме того, полюсы разного знака, появляющиеся в точках пересечения магнитными линиями поверхности среды, находятся также относительно близко друг к другу. Все это приводит к значительному размагничивающему эффекту и предопределяет большие значения коэффициента N , осложняющие определение χ . В свою очередь коэффициент N также может зависеть как от геометрических условий измерения, так и от восприимчивости χ (или χ').

На коэффициент размагничивания N влияет и способ питания генераторной катушки. При стабильном магнитном моменте коэффициент $N = N_M$, а при неизменной амплитуде питающего тока $N = N_I$. В последнем случае из-за подмагничивания сердечника вторичным полем \vec{H}' возрастает магнитный момент и первичное поле в магнитной среде. Данный эффект частично компенсирует размагничивающее действие среды, и поэтому значение $N_I < N_M$.

При низкой магнитной восприимчивости контролируемой среды различие между значениями χ и χ' практически исчезает, и формула (2.35) сводится к линейному соотношению (2.29).

Точность определения магнитной восприимчивости согласно (2.29) не хуже 10 % при $\chi N < 0,1$. Данное требование обычно выполняется для сред с $\chi \leq 0,1$, которые относятся к слабомагнитным. В таких средах вторичное размагничивающее поле пренебрежимо мало по сравнению с первичным полем, поэтому каждый элементарный объем среды намагничивается независимо от всех других и вносит аддитивный вклад в величину ΔE . С увеличением χ произведение χN в формуле (2.36) начинает давать значительную добавку к единице. Зависимости отношения $\Delta E/E_0$ и кажущейся восприимчивости χ' от χ стремятся при $\chi \rightarrow \infty$ к асимптотическим значениям, составляющим G/N и $1/N$. Каждая из кривых быстрее выходит на свою асимптоту, и ее нелинейность возрастает при увеличении коэффициента N . Среда со значением χ , попадающим в интервал нелинейной зависимости ΔE от χ , принято называть сильномагнитными.

Величинами G и N в значительной мере определяются и другие метрологические особенности измерительного зонда и аппаратуры контроля в целом.

Например, из формулы (2.35) следует, что значение $|G|$ равно отношению вторичного поля, измеренного в среде с $\chi' = 1$, к первичному полю. Чем больше модуль геометрического фактора, 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' (или χ для слабомагнитной среды):

$$|\Delta E|/\chi' = |G|E_0. \quad (2.37)$$

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".

От коэффициента размагничивания N зависит разрешающая способность измерительного зонда при малых изменениях χ . Ее удобно определять по тангенсу угла наклона кривой χ' (χ) к оси абсцисс, который устанавливается дифференцированием выражения (2.36):

$$\frac{\partial \chi'}{\partial \chi} = \frac{1}{(1 + N\chi)^2}. \quad (2.38)$$

Согласно (2.38), с увеличением кажущейся восприимчивости χ разрешающая способность зонда резко падает от единичного значения, присущего слабомагнитным средам, до значений второго порядка малости величины $1/(N\chi)$ в случае контроля сильномагнитных сред. Из формулы (2.38) следует, что погрешности $\delta\chi'$ и $\delta\chi$ связаны соотношением

$$\frac{\delta\chi}{\chi} = (1 + N\chi) \frac{\delta\chi'}{\chi'}, \quad (2.39)$$

из которого получаются два предельных равенства:

$$\frac{\delta\chi}{\chi} = \frac{\delta\chi'}{\chi'}, \text{ при } \chi \ll 1; \quad (2.40)$$

$$\frac{\delta\chi}{\chi} = N\chi \frac{\delta\chi'}{\chi'}, \text{ при } \chi \gg 1. \quad (2.41)$$

Согласно этим равенствам, относительная погрешность определения восприимчивости χ сильномагнитной среды в $N\chi$ раз больше, чем слабомагнитной. Откуда следует необходимость применения высокоточных измерений величин ΔE и E_0 при исследовании, в частности, магнетитовых руд.

Влияние вихревых токов, индуцируемых в проводящей среде при увеличении частоты намагничивающего тока, проявляется в возникновении еще двух составляющих магнитного поля. Одна из них (активная) сдвинута на угол 90° по отношению к первичному полю и может быть исключена при синхронном выпрямлении в аппаратуре контроля. Другая составляющая (реактивная) находится в противофазе с первичным полем, поэтому добавляется в виде помехи к полезному сигналу и создает экранирующий эффект проводящей среды. Этот эффект можно уменьшить лишь снижением частоты намагничивающего тока.

Практически влияние вихревых токов ограничивает применение каждого конкретного типа аппаратуры и методов индукционных измерений магнитной восприимчивости в целом. Следует также учитывать, что повышение частоты возбуждающего сигнала в генераторной обмотке уменьшает глубину проникновения магнитного поля в контролируемую среду, особенно при ее высокой удельной электропроводности. В итоге уменьшается достоверность контроля объемной (усредненной) магнитной восприимчивости среды, так как в этом случае оценивается содержание железа только в ее приповерхностном слое. Практически высокочастотное поле формируется в приборах контроля, выполняющих обратную задачу – определение толщины проводящего покрытия по ослаблению измеряемого сигнала за счет потерь на вихревые токи.

2.1.2 Вычисление геометрического фактора и коэффициента размагничивания

Расчет геометрического фактора G зонда сводится к следующим этапам.

1. Вычисляются интегралы (2.19), определяющие первичное поле в объеме приемной катушки и в среде.

2. По формуле (2.24) находится магнитный поток первичного поля, проходящий через витки приемной катушки.

3. Вычисляется внутренний интеграл (2.31) от первичного поля по объему контролируемой среды и тем самым фактически устанавливается вторичное поле в пределах приемной катушки.

4. Полученные при этом значения интегрируются по площадям витков приемной катушки, и затем на основании формулы (2.31) находится фактор G_M .

Для определения значения G_I необходимо дополнительно рассчитать интегралы (2.32) и (2.33). Вычислительные трудности многократно возрастают при определении коэффициента размагничивания N_M , так как для этого требуется находить вторичное поле при достаточно высоких значениях χ путем численного решения интегрального уравнения (2.27).

Такая вычислительная схема является достаточно общей и оказывается чрезмерно трудоемкой. Значительно более простой и доступный способ определения вторичного поля намагничиваемой среды состоит в решении соответствующей краевой задачи.

Решение краевых задач магнитостатики имеет основное значение для практической разработки индукционных методов контроля магнитной восприимчивости горных пород и руд в условиях естественного залегания. Форма поверхности исследуемой магнитной среды при этом оказывает решающее влияние на структуру измеряемого поля. Уже одного этого обстоятельства достаточно, чтобы подразделять указанные методы на каротаж, где основной границей раздела является цилиндрическая поверхность скважины, и на метод измерения на плоской поверхности, в качестве которой можно рассматривать стенки горных выработок, добычу полезных ископаемых открытым способом и т.п.

Для индукционных методов измерения магнитной восприимчивости основное значение имеют два варианта краевых задач. В первом, наиболее распространенном варианте, предполагается стабильность магнитного момента источника поля. Потенциал вторичного поля φ_0 , который должен быть задан, вычисляется по формуле (2.15) или по простому соотношению, например (2.21).

В немагнитной среде, где располагается источник поля, общий потенциал $\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi'$, причем потенциал φ' учитывает влияние магнитной среды, и с учетом соотношений (2.1), (2.6) и (2.7) удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\nabla^2 \varphi_1' = 0. \quad (2.42)$$

На основании аналогичных соотношений уравнение Лапласа получается и для потенциала φ_2 в исследуемой однородной магнитной среде:

$$\nabla^2 \varphi_2 = 0. \quad (2.43)$$

На поверхности магнитной среды должны выполняться граничные условия, вытекающие из формул (2.3) и (2.7):

$$\varphi_1 = \varphi_2; \quad \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \mu \frac{\partial \varphi_2}{\partial n}. \quad (2.44)$$

Во втором, более сложном варианте краевой задачи, первичным считается только потенциал токовой обмотки генераторной катушки ($\varphi_0 = \varphi_{0I}$), вычисляемый по формуле (2.14). Сердечник в этом случае рассматривается в качестве второй однородной магнитной области, в точках которой потенциал φ_3 удовлетворяет уравнению Лапласа. На поверхности сердечника должны соблюдаться граничные условия, которые получаются из равенств (2.44) заменой параметра φ_2 на φ_3 и проницаемости μ на магнитную проницаемость сердечника μ_Φ .

Эти краевые задачи имеют единственные решения, которые для цилиндрической и плоской границ раздела могут быть определены, например, методом разделения переменных. На основании общего решения для потенциалов можно получить соотношения для магнитных потоков, проходящих через витки приемной катушки, и выражения для расчета первичной и вторичной ЭДС.

Из общего решения краевой задачи для отношения $\Delta E/E_0$ предельным переходом в соответствии с формулами (2.35) и (2.36) получается выражение геометрического фактора

$$G = \lim_{\chi \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\chi E_0}. \quad (2.45)$$

После вычисления $\Delta E/E_0$ и G на основании формул (2.35) и (2.36) можно найти коэффициент размагничивания

$$N = (E_0/\Delta E)G - 1/\chi. \quad (2.46)$$

При использовании данных первого варианта краевой задачи по формулам (2.45) и (2.46) вычисляются G_M и N_M второго варианта, т. е. G_I и N_I .

В случаях, когда значения G и N устанавливаются на основании экспериментальных данных, формулы (2.35) и (2.36) представляют в виде

$$(\Delta E_i/E_0)(1 + N\chi_i) = G\chi_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.47)$$

где $\Delta E_i/E_0$ – относительное приращение ЭДС среды, имеющей магнитную восприимчивость χ_i .

Коэффициенты G и N находятся в этом случае решением системы линейных уравнений (2.47) методом наименьших квадратов.

У фокусирующих зондов зависимость фактора G от величины зазора между зондом и плоской поверхностью имеет экстремум. Благодаря этому суще-

ственно снижается влияние изменяющихся геометрических условий измерения на выходные показания прибора и, кроме того, чувствительность зонда в соответствии с формулой (2.37) достигает максимального значения.

При определенном соотношении геометрических параметров фокусирующими свойствами может обладать и двухкатушечный зонд. Однако, его фокусировку можно обеспечить лишь с помощью дополнительной катушки, включенной последовательно и встречно в цепь главной приемной катушки.

При наличии фокусирующей катушки приращение ЭДС в приемной цепи под влиянием слабомагнитной среды составляет

$$\Delta E = E_{0\Pi} G_{\Pi} \chi - E_{0\Phi} G_{\Phi} \chi, \quad (2.48)$$

где $E_{0\Pi}$ и $E_{0\Phi}$ – ЭДС, индуцируемые в воздухе в приемной и фокусирующей катушках соответственно; G_{Π} и G_{Φ} – геометрические факторы данных катушек.

Выражение (2.48) можно представить в виде (2.29), если нормирующая ЭДС равна разностной ($E_0 = E_{0\Pi} - E_{0\Phi}$), а общий геометрический фактор равен

$$G = (G_{\Pi} - \tau G_{\Phi}) / (1 - \tau), \quad (2.49)$$

где $\tau = E_{0\Phi} / E_{0\Pi}$ – отношение ЭДС фокусирующей и приемной катушек.

Для обеспечения фокусировки значение τ должно быть выбрано определенным образом. Пусть необходимо получить экстремум вертикальной характеристики в определенном интервале расстояний h до плоской поверхности среды или экстремум радиальной характеристики в некотором интервале l_{Π} . Числитель формулы (2.46) на этом интервале должен незначительно отличаться от своего начального значения [28]. Тогда, используя критерий наименьших квадратов, можно определить экстремум функции по выражению

$$F(\tau) = \int_{t_1}^{t_2} [G_{\Pi}(t) - \tau G_{\Phi}(t) - G_{\Pi}(t_1) + \tau G_{\Phi}(t_1)]^2 dt, \quad (2.50)$$

которое соответствует искомому значению

$$\tau = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [G_{\Pi}(t) - G_{\Pi}(t_1)][G_{\Phi}(t) - G_{\Phi}(t_1)] \partial t}{\int_{t_1}^{t_2} [G_{\Phi}(t) - G_{\Phi}(t_1)]^2 \partial t}, \quad (2.51)$$

где переменная t обозначает величину зазора h между зондом и плоской поверхностью или размер зонда l_{Π} , принимая на концах интервала соответственно значения t_1 и t_2 .

Краевые задачи для квазистационарного поля, значительно более сложные, чем для магнитоэлектростатического, приходится рассматривать искажающее влияние проводимости горных пород и руд на точность определения их магнитной восприимчивости [11]. Кроме того, на основе решения этих задач появляется возможность комплексной интерпретации, позволяющей найти два основных параметра среды: магнитную восприимчивость и удельную проводимость.

2.2 Методика индукционных измерений магнитной восприимчивости

Методика индукционных измерений магнитной восприимчивости реализуется тремя этапами [29].

1. Выделение горных пород и руд с разной магнитной восприимчивостью и установление границ пластов и их мощностей.

2. Определение средней (эффективной) магнитной восприимчивости для каждого представляющего интерес контролируемого рудного пласта (отдельной его части) или плоского участка.

3. Использование полученных данных для решения различных практических задач: литологического расчленения разрезов, выделения скважного оруднения, определения глубины залегания руды, мощности рудных залежей, а также оценки качества магнетитовых руд.

Второй этап – определение магнитной восприимчивости – целесообразно рассмотреть для сред с высокими значениями χ .

В природных условиях к сильномагнитным средам относятся, главным образом, железные руды преимущественно магнетитового состава. Трудности контроля качества руды в этом случае возникают из-за существенно нелинейной зависимости ΔE от χ . Основные рекомендации по определению χ применимы только для достаточно однородных и протяженных пластов.

Из формул (2.35) и (2.36) следует, что

$$\chi = \chi' / (1 - N\chi'), \quad (2.52)$$

где параметр χ' определяется выражением

$$\chi' = (1/G)(\Delta E/E_0). \quad (2.53)$$

Если расчетами наряду с фактором G установлен коэффициент размагничивания N , то по формулам (2.52) и (2.53) проводятся абсолютные определения χ . С учетом возможной зависимости N от χ' эти формулы являются строгими.

Соотношение (2.53) можно представить в виде

$$\chi' = (k_{ст}/G)(n/n_{ст}), \quad (2.54)$$

в котором градуировочную ЭДС и коэффициент $k_{ст}$ выбирается исходя из предельного значения $\chi'_{\max} = 1/N$. Иногда для градуировки используется полная ЭДС в воздухе, когда $n_{ст} = n_0$ и $k_{ст} = 1$.

Ввиду линейной зависимости χ' от n шкала контролирующего прибора должна выражаться в единицах кажущейся магнитной восприимчивости. Ее значения непосредственно (или с пересчетом для другого коэффициента N) должны соответствовать количественному содержанию магнетита или связанного с ним железа в рудной массе.

При графическом изображении результатов каротажных измерений наряду с линейной шкалой χ' можно использовать преобразованную по формуле (2.52) нелинейную шкалу χ . Отсчет по такой шкале дает магнитную восприимчивость для достаточно мощного однородного пласта. В общем случае при усреднении по определенному интервалу получается эффективная восприимчивость. Ее значение зависит от распределения магнитной восприимчивости в точках среды, находящихся в пределах глубины исследований, т. е. от пространственного распределения магнитных минералов, от текстурных и структурных особенностей породы или руды, а также от мощности пласта (размеров плоской площадки).

На железорудных месторождениях практическое значение имеют достаточно протяженные рудные пласты. При необходимости влияние мощности сильномагнитного пласта можно учитывать на основании опытно-методических работ и измерений на моделях.

Трудности определения χ неоднородных сильномагнитных объектов проявляются не только при измерениях в естественных условиях, но и при исследовании образцов руды. Например, если влияние текстурных особенностей образца магнетитовой руды существенно выше, чем влияние его формы, учитываемое с помощью коэффициента размагничивания, то реальное значение параметра χ можно определить только с большой погрешностью.

Методика индукционных измерений магнитной восприимчивости обычно используется в предположении, что генераторная катушка с заданным магнитным моментом является единственным неизменным источником поля. В реальных конструкциях зонда собственный магнитный момент может приобретать и приемная (измерительная) катушка, например, из-за намагничивания ее сердечника, а также вследствие протекания тока, потребляемого измерительной цепью. Чтобы обеспечить необходимую точность определения магнитной восприимчивости χ влияние этого дополнительного (мешающего) источника сигнала необходимо исключать аппаратным путем или введением поправок. Практически введение поправок в цифровых приборах контроля выполняется микроконтроллером программным путем без дополнительных временных затрат.

2.3 Оценка магнитного момента генераторной катушки

При индукционных измерениях магнитной восприимчивости источником поля является генераторная катушка с токовой обмоткой и ферромагнитным сердечником. Благодаря сердечнику, уменьшается потребление мощности в генераторной цепи и увеличивается амплитуда полезного сигнала, который пропорционально зависит от магнитного момента генераторной катушки. Магнитный момент на расстояниях, намного превышающих линейные размеры генераторной катушки, определяет и структуру первичного магнитного поля.

При индукционных измерениях в скважине или на плоской поверхности приходится считаться с влиянием исследуемой среды на источник поля. Это влияние может выражаться в изменении полного сопротивления и магнитного момента генераторной катушки. Данное обстоятельство усложняет количественную обработку результатов измерений и затрудняет использование теоретических выводов, так как методика измерения обычно базируется на расчетных зависимостях, полученных в предположении, что момент генераторной катушки в процессе измерения остается неизменным. В каротаже магнитной восприимчивости нестабильность момента ухудшает геометрические характеристики зондов, увеличивая влияние переменного диаметра скважины. Вопрос о стабилизации момента при измерениях в магнитных средах был поставлен в работе [30], однако конкретные результаты были получены в работах [31, 32] позднее.

Рассмотрим генераторную катушку цилиндрической формы с намагничивающей обмоткой, равномерно размещенной по длине сердечника (Рис. 2.2).

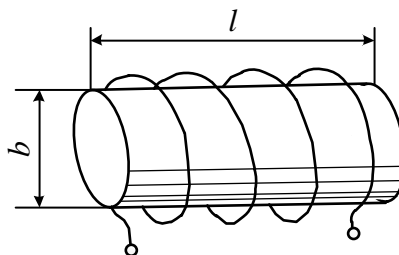


Рисунок 2.2 – Генераторная катушка цилиндрической формы

Магнитный момент M генераторной катушки выражается суммой

$$M = IS_B w + \int_{V_\Phi} J_\Phi \partial V, \quad (2.55)$$

где I – сила тока в обмотке; S_B – средняя площадь витка;

w – общее число витков; V_Φ – объем сердечника;

J_Φ – осевая составляющая намагниченности сердечника.

Первое слагаемое M_I учитывает вклад тока, а второе M_J – вклад намагниченности сердечника, и поэтому формулу (2.55) можно представить как

$$M = IS_B w(1 + m), \quad (2.56)$$

где $m = M_J/M_I$ – безразмерный параметр, указывающий, во сколько раз момент сердечника превосходит момент обмотки. Можно также считать, что m – это момент сердечника, выраженный в единицах момента обмотки.

Благодаря присутствию сердечника более чем в m раз увеличиваются магнитный момент, первичное поле и чувствительность измерений, а также отношение "полезный сигнал/внешняя помеха".

Для определения параметра m преобразуем формулу (2.55) к виду

$$M = \left(I + J_{cp} \frac{S_\Phi l}{S_B w} \right) S_B w, \quad (2.57)$$

где l и S_Φ – длина и площадь сечения сердечника; J_{cp} – средняя намагниченность.

Интегрируя определяющее равенство (2.4) для напряженности поля, имеем

$$B_{cp} S_B = \mu_0 (H_{cp} S_B + J_{cp} S_\Phi),$$

где B_{cp} и H_{cp} – средние значения индукции и напряженности магнитного поля.

Учитывая непрерывность касательной составляющей напряженности поля, предполагаем, что ее средние значения по сердечнику и по объему между сердечником и средним витком примерно одинаковы. Тогда на основании уравнения связи (2.6) получаем

$$B_{\text{cp}} S_B = \mu_0 \mu_{\Phi} H_{\text{cp}} S_{\Phi} + \mu_0 H_{\text{cp}} (S_B - S_{\Phi}), \quad (2.58)$$

где μ_{Φ} – магнитная проницаемость материала сердечника.

Комбинируя два последних равенства, находим

$$J_{\text{cp}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{S_B}{S_{\Phi}} \cdot \frac{\mu'_{\Phi} - 1}{\mu'_{\Phi}} B_{\text{cp}}, \quad (2.59)$$

где

$$\mu'_{\Phi} = 1 + (\mu_{\Phi} - 1) S_{\Phi} / S_B. \quad (2.60)$$

Для однослойных катушек, намотанных непосредственно на ферромагнитный сердечник, значения $S_{\Phi} = S_B$ и $\mu'_{\Phi} = \mu_{\Phi}$.

Введем в формулу (2.59) магнитный поток $\Phi = B_{\text{cp}} S_B w$, который выразим через индуктивность катушки $L = \Phi / I$. В итоге имеем

$$J_{\text{cp}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{1}{S_{\Phi}} \cdot \frac{\mu'_{\Phi} - 1}{\mu'_{\Phi}} L I. \quad (2.61)$$

Подстановкой этого выражения в формулу (2.57) находим момент

$$M = I \left(1 + \mu_{\text{д}} \frac{\mu'_{\Phi} - 1}{\mu'_{\Phi}} \cdot \frac{L}{L'_0} \right) S_B w, \quad (2.62)$$

где

$$L'_0 = \mu_0 \mu_{\text{д}} S_B w^2 / l, \quad (2.63)$$

$\mu_{\text{д}}$ – действующая магнитная проницаемость сердечника.

Так как проницаемость μ_d характеризует степень усиления магнитного потока, то значение μ_d можно найти экспериментально, измеряя индуктивность катушки при наличии или отсутствии сердечника. В частности, когда катушка индуктивности находится в воздухе, ее момент определяется формулой

$$M_0 = I_0 \left(1 + \mu_d \frac{\mu'_\Phi - 1}{\mu'_\Phi} \cdot \frac{L_0}{L'_0} \right) S_B w, \quad (2.64)$$

где I_0 и L_0 – сила тока и индуктивность катушки в воздухе.

Входящий в формулы (2.62) и (2.64) коэффициент L'_0 определяется на основе соотношения (2.63) для индуктивности бесконечно длинной катушки, обладающей параметрами реальной. Следовательно, величина $L'_0 > L_0$ приближается к значению L_0 только при увеличении длины сердечника l .

Сопоставление формул (2.56) и (2.64) позволяет получить значение параметра m в воздухе

$$m_0 = \mu_d \frac{\mu'_\Phi - 1}{\mu'_\Phi} \cdot \frac{L_0}{L'_0}. \quad (2.65)$$

При отсутствии ферромагнитного сердечника ($\mu_\Phi = 1$), $\mu_0 = 0$, а при его наличии значение относительной магнитной проницаемости $\mu'_\Phi \gg 1$, поэтому

$$m_0 = \mu_d (L_0/L'_0). \quad (2.66)$$

На практике используют сердечники с небольшим отношением длины l к диаметру b , что позволяет ослабить влияние нестабильности магнитных свойств материала сердечника на его момент. Действующая проницаемость при этом почти совпадает с проницаемостью формы [33, 34]:

$$\mu_d = (1/N_\Phi)(S_\Phi/S_B), \quad (2.67)$$

где N_{Φ} – коэффициент размагничивания сердечника, зависящий от отношения $\xi = l/b$; множитель S_{Φ}/S_B учитывает убывание магнитной индукции между обмоткой и сердечником из-за размагничивающего влияния сердечника.

Например, для сильно вытянутых эллипсоидов

$$N_{\Phi} = (\ln 2\xi - 1) / \xi^2, \quad (2.68)$$

поэтому с учетом формул (2.66–2.68) получим

$$m_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{l^2}{S_B} \cdot \frac{1}{\ln 2\xi - 1}. \quad (2.69)$$

Формула (2.69) отражает увеличение магнитного момента, который возрастает при увеличении длины сердечника и становится слабее – при его утолщении. Данный вывод хорошо согласуется с известными данными [35].

Значение m_0 можно получить экспериментально, учитывая пропорциональные зависимости

$$M_{0I} \sim E'/I'; \quad M_{0J} \sim (E/I - E'/I'),$$

где E – ЭДС приемной катушки при силе тока I в генераторной катушке с ферромагнитным сердечником; E' и I' – соответствующие величины при вынужденном сердечнике. С учетом формулы (2.56) получаем

$$m_0 = \frac{E/I - E'/I'}{E'/I'}. \quad (2.70)$$

Экспериментально установлено, что магнитный момент сердечника катушки может превышать магнитный момент ее обмотки более чем в 30 раз [11], причем зависимость m_0 от диаметра сердечника согласуется с формулой (2.69).

Зависимость момента M и чувствительности зонда от числа витков w генераторной катушки выражается формулой (2.56), в которой следует учитывать, что параметр m от числа w не зависит. Согласно формуле (2.56), при стабилизированном намагничивающем токе магнитный момент прямо пропорционален числу витков w . Однако на практике обычно применяется генератор со стабилизированным выходным напряжением U_{Π} , поэтому если индуктивное сопротивление катушки значительно превосходит ее активное сопротивление, то момент

$$M = \frac{U_{\Pi}}{\omega L} (1 + m) S_B w,$$

где ω – угловая частота намагничивающего тока.

Учитывая, что индуктивность L пропорциональна квадрату числа витков, получаем магнитный момент $M \sim 1/w$. Возможность уменьшения числа w ограничена допустимым значением тока, который можно получить от генератора при условии сохранения постоянства амплитуды U_{Π} в заданных пределах.

2.4 Исключение влияния магнитного момента приемной катушки

Если магнитный момент приемной катушки обусловлен намагничиванием ее сердечника в поле генераторной катушки, то такой момент пропорционален полной ЭДС индукции. При наличии компенсационной катушки общая ЭДС определяется суммой ЭДС E генераторной и ЭДС E_k компенсационной катушки. В результате взаимодействия приемной катушки с контролируемой средой возбуждается также дополнительная вторичная ЭДС ΔE , которая приводит к погрешности определения восприимчивости χ [36]. Величину ΔE можно воспроизвести экспериментально, создавая момент приемной катушки пропусканием через нее стабилизированного тока такой силы, что напряжение в воздухе составляет $U_0 = E + E_k$. Тогда приращение $\Delta U \approx \Delta E$, и поэтому становится справедливым равенство

$$\Delta E = (E + E_{\kappa}) \frac{G_I' \chi}{1 + N_I' \chi}, \quad (2.71)$$

где G_I' и N_I' – геометрический фактор и коэффициент размагничивания приемной катушки, действующей как однокатушечный зонд.

Чтобы определить погрешность измерения кажущейся восприимчивости, обе части равенства (2.71) нужно разделить на значение геометрического фактора G_M двухкатушечного зонда и ЭДС в воздухе:

$$\Delta \chi' = \frac{E + E_{\kappa}}{E_0} \cdot \frac{G_I'}{G_M} \cdot \frac{\chi}{1 + N_I' \chi}. \quad (2.72)$$

Погрешность определения величины χ вычисляется по формуле

$$\Delta \chi = \frac{\chi' + \Delta \chi'}{1 - N_M (\chi' + \Delta \chi')} - \chi, \quad (2.73)$$

где N_M – коэффициент размагничивания двухкатушечного зонда.

Подставляя сюда равенства для χ' (2.72) и $\Delta \chi'$ (2.73) можно определить погрешность, вызванную магнитным моментом приемной катушки:

$$\frac{\Delta \chi}{\chi} = \frac{E + E_{\kappa}}{E_0} \cdot \frac{G_I'}{G_M} \cdot \frac{1 + N_M \chi}{1 + N_I' \chi} (1 + N_M \chi) \times \left(1 - \frac{E + E_{\kappa}}{E_0} \cdot \frac{G_I'}{G_M} \cdot \frac{1 + N_M \chi}{1 + N_I' \chi} N_M \chi \right)^{-1}. \quad (2.74)$$

В случае слабомагнитной среды значение $N_M \chi \ll 1$, $N_I' \chi \ll 1$, поэтому общее соотношение (2.74) существенно упрощается:

$$\frac{\Delta \chi}{\chi} = \frac{E + E_{\kappa}}{E_0} \cdot \frac{G_I'}{G_M}. \quad (2.75)$$

Максимальная погрешность возникает при компенсации ЭДС E_0 неиндукционным способом, например, с помощью встречного напряжения, действующего в приемной цепи, когда $E_k = 0$, $E \approx E_0$ и $\Delta\chi/\chi = G'_I/G_M$. Для катушек с сердечниками отношение геометрических факторов составляет 0,1 – 0,3 [11], и в результате получается погрешность, которой нельзя пренебречь.

Для исключения магнитного момента сердечника его можно размагнитить полем компенсационного тока. Если ЭДС E_k , индуцируемая этим током, компенсирует ЭДС в воздухе, то $E_k = -E_0$ и $E + E_k = \Delta E$. Так как приращение ЭДС $\Delta E = E_0 G_M \chi$, то из формулы (2.75) находим $\Delta\chi/\chi = G'_I \chi$. Для контролируемой среды с $\chi \leq 0,1$ такая погрешность не превышает значения 1 – 3 %. Таким образом, в случае слабомагнитной среды указанный способ компенсации устраняет влияние момента приемной катушки. При этом особое значение имеет выбор конкретной схемы компенсации, который определяется следующими факторами.

При расположении компенсационной обмотки вблизи приемной катушки последняя приобретает значительный квадрупольный момент, влияние которого проявляется при измерениях в неоднородных средах. Поэтому компенсационную обмотку лучше всего размещать непосредственно на приемной катушке равномерно по всей длине. Обмотка может выходить за пределы сердечника, что обеспечивает более однородное компенсационное поле. Можно вообще отказаться от компенсационной обмотки и использовать для этой цели обмотку измерительной катушки. Компенсирующий ток должен быть пропорционален магнитному моменту, чтобы скомпенсировать ЭДС E_k по амплитуде и фазе.

В случае сильномагнитных сред ЭДС E изменяется в широком диапазоне. Поэтому сердечник приемной катушки может оказаться размагниченным, и погрешность $\Delta\chi$ будет минимальна только для одного значения χ , при котором суммарная ЭДС $E + E_k$ близка к нулю. Из формулы (2.74) следует, что погрешность $\Delta\chi/\chi$ с увеличением восприимчивости не возрастает, если выполняется условие $E + E_k \rightarrow 0$ при $\chi \rightarrow \infty$. При достаточно большой длине зонда, действующего по принципу экранирования, ЭДС $E \rightarrow 0$ при увеличении χ . У таких

зондов компенсация первичной ЭДС обычно отсутствует ($E_k = 0$), $N_M \approx -G_M$ и $E_0/E = 1 + N_M\chi \gg 1$, поэтому на основании выражения (2.74) для них получается

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} \approx -\frac{G'_I}{N'_I} \cdot \frac{1}{1 + G'_I/N'_I}. \quad (2.76)$$

Для катушки с сердечником фактор G'_I в несколько раз меньше коэффициента N'_I , поэтому погрешность, вычисленная по формуле (2.76), может составлять десятки процентов. С увеличением диаметра d_c отношение G'_I/N'_I быстро убывает, однако и в скважинах большого диаметра влиянием момента нельзя пренебрегать. Например, даже при $d_c/d_\Phi = 9$ в случае длинного сердечника с проницаемостью $\mu_d = 6$ или $\mu_d = 22$ погрешность изменяется от 2 до 8 %.

Следовательно, если не предъявлять высоких требований к метрологическим свойствам аппаратуры, то приемную катушку с ферромагнитным сердечником можно использовать в приборах для исследования эксплуатационных скважин большого диаметра. В других случаях от сердечника в приемной катушке зонда лучше вообще отказаться. Приемная цепь при этом должна обладать высоким входным сопротивлением, чтобы исключить появление тока и связанного с ним магнитного момента, т. е. работать в режиме холостого хода.

Зависимость магнитного момента генераторной катушки от вносимой индуктивности, возникающей под влиянием магнитной среды, характеризуется наличием пологого максимума. Это позволяет стабилизировать момент путем использования генераторной цепи с оптимальной добротностью, обеспечивающей появление максимума в рабочем диапазоне вносимой индуктивности [31, 32].

Повышение точности и чувствительности измерений магнитной восприимчивости χ можно обеспечить применением для компенсации первичной ЭДС и для управления синхронным выпрямителем напряжения, пропорционального магнитному моменту [31]. Для контроля хорошо проводящих руд целесообразно использовать способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки путем поддержания на одном уровне пропорционального ему напряжения.

2.5 Выводы по второй главе

1. В результате проведенного анализа установлено, что количественная оценка содержания железа в магнетитовых рудах реализуется индукционным косвенным методом измерения, точность которого ограничивается влиянием геометрического фактора, зависящего от конструкции измерительного зонда, взаимного расположения генераторной и приемной катушек в зонде, а также от величины зазора между зондом и поверхностью контролируемой среды.

2. Для обеспечения необходимой точности определения магнитной восприимчивости необходимо исключать влияние магнитного момента приемной катушки аппаратурным путем или введением соответствующих поправок.

3. Изменение тока, протекающего в приемной катушке индуктивности при воздействии наведенного генераторной катушкой магнитного поля, приводит к появлению мешающего эффекта отражения, для ослабления которого необходимо в зонде применять усилители с высоким входным сопротивлением.

4. При измерениях в скважине или на плоской поверхности необходимо учитывать влияние исследуемой среды на источник поля, которое может выражаться в изменении полного сопротивления и магнитного момента генераторной катушки и, как следствие, усложняет количественную обработку результатов измерений.

5. Зависимость магнитного момента генераторной катушки от вносимой индуктивности, возникающей под влиянием магнитной среды, характеризуется наличием пологого максимума. Это позволяет стабилизировать момент путем использования генераторной цепи с оптимальной добротностью, обеспечивающей появление максимума в рабочем диапазоне вносимой индуктивности.

6. Согласно результатам анализа, для улучшения характеристик аппаратуры контроля необходимо, во-первых, повышать чувствительность измерительных зондов и, во-вторых, принимать меры для компенсации влияния геометрического фактора на результаты измерения магнитных параметров руды.

3 МЕТОД РЕЗОНАНСНОГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ СОДЕРЖАНИЯ ЖЕЛЕЗА В РУДЕ

3.1 Измерение магнитной восприимчивости на плоской поверхности

Измерения магнитной восприимчивости на плоской поверхности проводятся при исследовании обнажений, стенок горных выработок, а также при изучении образцов с плоскими гранями, естественными или созданными специально (например, распиливанием). Такой метод применяется на железорудных месторождениях для определения магнитной восприимчивости и содержания магнетита на стенках горных выработок, в измельченной рудной массе, магнетитовом концентрате и т. п. [37].

Источники электромагнитного поля совместно с приемниками образуют измерительный зонд, который в простейшем случае состоит из генераторной и приемной катушек. Если зонд расположен над центральной частью плоской поверхности изучаемого однородного объекта, протяженность которого во всех направлениях достаточно велика по сравнению с размерами зонда, то влияние объекта, намагниченного в первичном поле, является практически таким же, как у однородного полупространства с плоской границей раздела.

Витки с током можно заменить магнитными листками, поэтому все источники первичного поля (обмотку и сердечник генераторной катушки) можно характеризовать некоторым распределением намагниченности \vec{J}_n , которая в разных точках может различаться по значению и по направлению. Если намагниченность проинтегрировать по всему объему V , занятому источниками, то получается их суммарный момент, определяемый выражением

$$\vec{M} = \int_V \vec{J}_n(x', y', z') \partial V,$$

где x', y', z' – координаты элементарного объема ∂V .

Если влиянием проводимости среды пренебречь, то магнитное поле в воздухе и в нижнем полупространстве описывается скалярным потенциалом. При отсутствии изучаемой среды поле определяется только заданными источниками.

Потенциал источников складывается из потенциалов элементарных диполей и определяется преобразованной формулой (2.15)

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}_n(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV, \quad (3.1)$$

где \vec{r} и \vec{r}' – радиус-векторы соответственно точек наблюдения и источника.

Изучаемая среда, намагничиваясь в первичном поле источников, изменяет потенциал в воздухе на величину φ' . Обозначим суммарный потенциал в воздухе $\varphi_1 = \varphi_0 + \varphi'$, а потенциал в среде – φ_2 . Выражения для потенциалов можно определить в предположении, что намагниченное полупространство создает в воздухе поле, конфигурация которого совпадает с полем отраженных источников, и поэтому значение $\varphi'(x, y, z) = \gamma\varphi_0(x, y, -z)$. Тогда

$$\varphi_1(x, y, z) = \varphi_0(x, y, z) + \gamma\varphi_0(x, y, -z), \quad (3.2)$$

где γ – коэффициент отражения, учитывающий интенсивность намагниченности фиктивных источников.

Принимая предположение, что потенциал в среде отличается от потенциала поля первичных источников только множителем κ , можно получить:

$$\varphi_2(x, y, z) = \kappa\varphi_0(x, y, z), \quad (3.3)$$

где κ – так называемый коэффициент пропускания.

Коэффициенты γ и κ определяются из граничных условий: непрерывности касательных компонент напряженности поля и нормальных составляющих

индукции. Если плоскость xu совпадает с поверхностью раздела, то при значении $z = 0$ должны выполняться соотношения (2.44). Подставляя в них равенства (3.2) и (3.3), получаем

$$\gamma = -0,5\chi', \quad (3.4)$$

где

$$\chi' = \chi/(1 + 0,5\chi). \quad (3.5)$$

Величина χ' представляет собой кажущуюся магнитную восприимчивость, вычисленную при коэффициенте размагничивания $N_M = 0,5$. Следовательно, потенциал в воздушной среде определяется формулой

$$\varphi_1 = \varphi_0(x, y, z) - 0,5\chi'\varphi_0(x, y, -z),$$

с учетом которой напряженность поля можно представить в виде суммы

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}',$$

где

$$\vec{H}_0 = -\text{grad}\varphi_0(x, y, z), \quad (3.6)$$

$$\vec{H}' = 0,5\chi'\text{grad}\varphi_0(x, y, -z). \quad (3.7)$$

Вектор \vec{H}_0 представляет собой первичное поле источников, а вектор H' – поле, обусловленное влиянием контролируемой среды.

Сравнение формул (3.6) и (3.7) показывает, что поле намагничиваемого полупространства определяется фиктивными источниками, которые образуются совмещением источников первичного поля с их изображением на границе раздела при изменении намагниченности $J_{и}$ в γ раз.

Определение восприимчивости по измерениям над плоской поверхностью облегчается тем, что зависимость вторичного поля от геометрических условий и восприимчивости среды согласно формуле (3.7) выражена в явном виде. При этом наблюдается однотипная зависимость первичного и вторичного полей от координат и постоянство коэффициента размагничивания.

Характер зависимости χ' от χ , согласно формуле (3.5), справедлив для произвольного первичного источника, но при условии, что намагниченность во всех его точках не изменяется под действием вторичного поля.

Практически стабилизацией источников первичного поля обеспечивается постоянство коэффициента размагничивания $N_M = 0,5$. Существование коэффициента размагничивания объясняется плоской формой поверхности, которая описывается уравнением первого порядка, и только в случае ограничивающей поверхности представляется уравнением второго порядка. Коэффициент размагничивания постоянен только для однородного намагничивающего поля.

Источниками первичного поля могут служить постоянные магниты или системы катушек, питаемые постоянным или переменным током низкой частоты. Лучше всего использовать переменный ток, поскольку в этом случае исключается геомагнитное поле и упрощается техника измерений [11].

Предположим, что магнитное поле является переменным и регистрируется индукционным приемником – катушкой, которая измеряет компоненту поля, направленную вдоль ее оси. Индуцируемая в приемной катушке ЭДС, равная скорости убывания магнитного потока, представляет собой сумму ЭДС первичного и вторичного полей $E = E_0 + \Delta E$, причем согласно формулам (2.27) и (3.7)

$$E_0 = -\frac{\partial\Phi_0}{\partial t}(x, y, z), \quad \Delta E = 0,5\chi' \frac{\partial\Phi_0}{\partial t}(x, y, -z). \quad (3.8)$$

Функция $\Phi_0(x, y, z)$ представляет собой магнитный поток в приемной катушке от влияния первичного поля, а $\Phi_0(x, y, -z)$ – поток в воздухе.

Наведенную этим потоком ЭДС в дальнейшем можно обозначить как

$$E^* = -\frac{\partial\Phi_0}{\partial t}(x, y, -z). \quad (3.9)$$

Используя формулы (3.8) и (3.9) можно представить соотношение для определения кажущейся восприимчивости в следующем виде

$$\chi' = -2(\Delta E/E^*). \quad (3.10)$$

Знак минус означает, что величина ΔE находится в противофазе с ЭДС E^* .

На основании формулы (3.10) величины χ' и χ можно определить по результатам электрических измерений. Приращение ΔE может быть измерено в присутствии исследуемой магнитной среды непосредственно, а ЭДС в воздухе может быть скомпенсирована или равна нулю. В противном случае следует измерять полные ЭДС E и E_0 в присутствии среды и при удалении от нее зонда на значительное расстояние, а затем вычислить $\Delta E = E - E_0$.

Для определения ЭДС E^* необходимо предварительно зафиксировать положение плоскости, совпадающей с поверхностью раздела, относительно измерительного зонда. Затем генераторная катушка помещается относительно зафиксированной плоскости и измеряется ЭДС приемной катушки, которая соответствует величине E^* . Можно также оставить источник поля на месте, а переместить аналогичным образом приемную катушку. После измерения значений ΔE и E^* по формуле (3.10) вычисляют χ' , а на основании зависимости (3.5) находят

$$\chi = \chi' / (1 - 0,5\chi') \quad (3.11)$$

или

$$\chi = 2|\Delta E| / (|E^*| - |\Delta E|).$$

Такой способ измерения χ основан на методе непосредственного моделирования отраженного источника. Его достоинство – возможность относительных измерений электрических сигналов, поскольку в формулы (3.10) и (3.11) входит отношение величин одного наименования. При этом наиболее трудоемкой и сложной операцией является определение ЭДС E^* , так как для перемещения катушек приходится разбирать зонд. Для достижения необходимой точности требуется также тщательно соблюдать постоянство геометрических условий измерения. Учитывая все эти обстоятельства, ЭДС E^* для данного измерительного зонда рационально измерять только один раз.

Возможные изменения интенсивности источника учитываются путем градуировки по стандартному сигналу $E_{ст}$, в качестве которого можно использовать ЭДС в воздухе приемной или градуировочной катушки, либо напряжение U на индуктивности генераторной катушки. Можно воспользоваться также какой-либо фиксированной частью любого из этих напряжений.

С учетом калибровки аппаратуры контроля по стандартному сигналу формула (3.10) может быть представлена в виде

$$\chi' = (1/G_M)(\Delta E/E_{ст}), \quad (3.12)$$

где

$$G_M = -0,5(E^*/E_{ст}). \quad (3.13)$$

Безразмерный коэффициент G_M , удовлетворяющий условию стабилизации напряжения, не зависит от интенсивности источника и имеет значение геометрического фактора. Для такой измерительной установки при ее фиксированном расположении относительно поверхности исследуемой среды этот коэффициент является величиной постоянной. Можно указать три способа определения геометрического фактора.

В первом случае коэффициент G_M согласно формуле (3.13) находится по результатам электрических измерений в воздухе, причем ЭДС E^* , как отмечалось выше, измеряется при помещении генераторной или приемной катушки в предполагаемой поверхности раздела (метод непосредственного моделирования отраженного источника). После этого катушки жестко закрепляются в основном положении. При этом генераторная катушка действует на приемную согласно формулам (3.10) и (3.11) как контролируемая среда с максимально возможным значением $\chi'_{\max} = 2$, отвечающим условию $\chi \rightarrow \infty$.

Второй способ состоит в том, что используются данные измерений над непроводящей средой с очень большой магнитной восприимчивостью. В качестве модели такой среды может служить ферритовая пластина, относительная проницаемость которой должна быть не меньше нескольких сотен единиц.

Согласно формуле (3.5) кажущаяся восприимчивость χ'_{Φ} в этом случае практически не зависит от проницаемости феррита и приближается к предельному значению $\chi'_{\max} = 2$, отличаясь от него менее, чем на 0,5 % при выполнении условия $\mu_{\Phi} > 400$. Измеряя приращение ЭДС ΔE_{Φ} над пластиной и величину $E_{\text{ст}}$, и принимая значение $\chi'_{\max} = 2$ по формуле (3.12) можно вычислить

$$G_M = -0,5(\Delta E_{\Phi}/E_{\text{ст}}). \quad (3.14)$$

Кроме того, значения геометрического фактора в простых случаях могут быть найдены чисто расчетным путем [11–13].

Рассмотренная теория пригодна, в частности, и для зондов с катушками, не имеющими сердечников. Первичное поле в этом случае зависит только от силы переменного тока в генераторной цепи. При одновременном измерении наряду с ЭДС и силы тока отпадает необходимость в его стабилизации.

Формулы (3.10), (3.12) и (3.14) в этом случае можно представить в виде

$$\chi' = -2(\Delta L/L^*) \text{ или } \chi' = (1/G_M)(\Delta L/L_{\text{ст}}), \quad (3.15)$$

где $G_M = -0,5(L^*/L_{\text{ст}})$,

L^* – взаимная индуктивность генераторной и приемной катушек;
 $L_{\text{ст}}$ – взаимная индуктивность генераторной и градуировочной катушек;
 ΔL – приращение взаимной индуктивности генераторной и приемной катушек под воздействием контролируемой среды.

Соотношения (3.5), (3.10) – (3.15) показывают, что при плоской границе раздела магнитную восприимчивость можно определить с помощью одних электрических измерений, не используя эталонов. Тем самым устанавливается возможность измерения абсолютных значений магнитной восприимчивости. При реализации этой методики необходимо учитывать влияние дополнитель-

ных источников, которые могут возникать вследствие намагничивания сердечников катушек измерительного зонда вторичным полем среды. Действие таких дополнительных источников может быть исключено конструктивными мерами.

Рассмотренная теория не подходит для зондов, у которых генераторная и приемная катушки размещены на одном ферромагнитном сердечнике, а зонд питается стабилизированным переменным током. В этом случае магнитный момент сердечника изменяется под воздействием исследуемой среды, что приводит к изменению коэффициента размагничивания от χ . Зонды этого типа не следует использовать для измерений высоких значений χ , однако они могут применяться при исследовании слабомагнитных рудных месторождений.

Для расчета геометрического фактора измерительного зонда с соосными генераторной и приемной катушками, ось которых параллельна контролируемой плоской поверхности, можно использовать функцию геометрического фактора G_{I0} , полученную для каротажа магнитной восприимчивости. В этом случае на основании формулы (2.49) вместо применения (2.51) можно получить

$$G_I = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_{I0}(d_i) \delta\psi, \quad (3.16)$$

где $d_i = 2h/\cos\psi$; h – величина зазора от оси зонда до плоской поверхности.

Формула (3.16) позволяет пересчитать радиальные каротажные характеристики зонда с длинным сердечником в вертикальные характеристики метода измерений на плоской поверхности контролируемой среды.

Для измерений на плоскости могут использоваться зонды с различной геометрической конструкцией. Они могут различаться размерами катушек, их удаленностью друг от друга и от контролируемой поверхности, а также ориентировкой осей катушек в пространстве. Дальнейшие исследования преследуют цель выделить из всего многообразия зондов наиболее перспективные для практического использования в аппаратуре индукционного контроля [38].

Для упрощения задачи рассмотрим зонд, длины катушек в котором значительно меньше расстояния $l_{\Gamma\Pi}$ между их центрами (рис. 3.1).

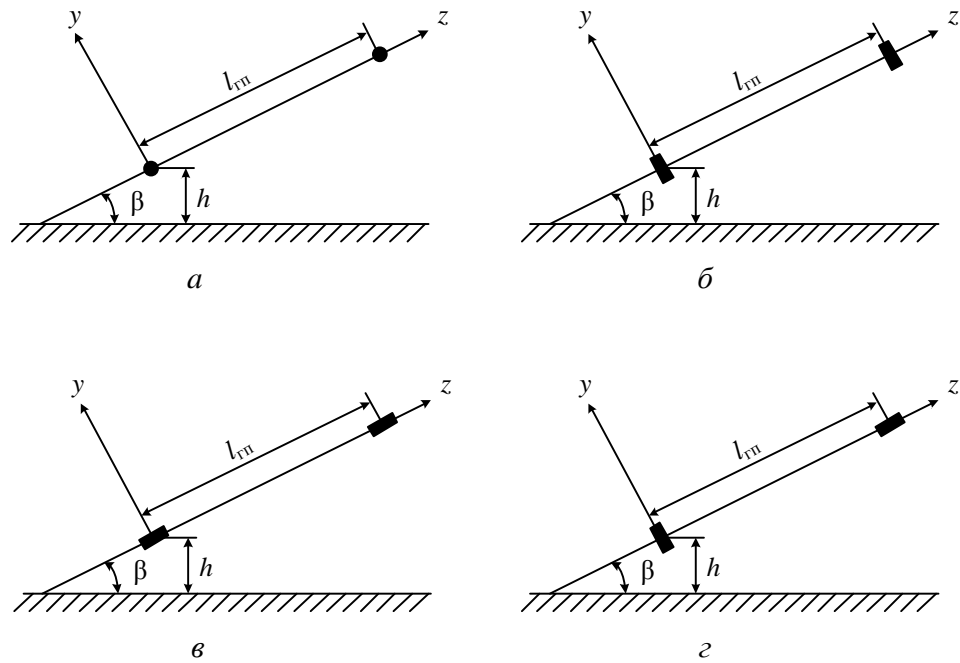


Рисунок 3.1 – Возможные варианты взаимного расположения катушек
в измерительном зонде

- a* – зонд с катушками, параллельными друг другу и плоскости поверхности;
б – зонд с катушками, параллельными друг другу и ортогональными плоскости поверхности;
в – зонд с соосными катушками, параллельными плоскости поверхности;
г – зонд с катушками, взаимно перпендикулярными друг другу

Допустим, что ближайшая к контролируемой среде катушка питается током и имеет момент \vec{M} , а удаленная катушка является приемной. Расстояние от ее центра до плоскости раздела обозначим h , а ось измерительного зонда, соединяющая центры катушек, образует с поверхностью среды угол β .

Измеряемое поле определяется суммой первичного поля \vec{H}_0 источника с моментом \vec{M} и вторичного поля \vec{H}' среды. Намагничиваемая среда с плоской поверхностью действует как отраженный диполь с моментом, отличающимся на множитель (3.4), равный $\gamma = -0,5\chi'$. Поэтому $\vec{H}' = \gamma\vec{H}^*$, где \vec{H}^* – поле отраженного диполя. Применяя декартову систему координат с началом в центре генераторной катушки и совмещая ось z с осью зонда, направление оси x будет

параллельно плоскости раздела. В такой системе магнитный момент содержит компоненты M_x , M_y и M_z , каждая из которых, намагничивая среду, порождает свое вторичное векторное поле $\overrightarrow{H'_x}$, $\overrightarrow{H'_y}$ и $\overrightarrow{H'_z}$, суммарное влияние которого

$$\overrightarrow{H'_x} + \overrightarrow{H'_y} + \overrightarrow{H'_z} = \gamma \left(\overrightarrow{H_x^*} + \overrightarrow{H_y^*} + \overrightarrow{H_z^*} \right), \quad (3.17)$$

где $\overrightarrow{H_x^*}$, $\overrightarrow{H_y^*}$ и $\overrightarrow{H_z^*}$ – магнитные поля диполей M_x^* , M_y^* и M_z^* , полученные отражением моментов M_x , M_y и M_z на плоскую поверхность среды.

Проекции векторов $\overrightarrow{H'_x}$, $\overrightarrow{H'_y}$ и $\overrightarrow{H'_z}$ можно выразить геометрическими факторами, которые согласно уравнению (3.13) пропорциональны компонентам полей источников. Заменяя в этой формуле величину E^* на проекцию любого вектора: $\overrightarrow{H_x^*}$, $\overrightarrow{H_y^*}$ и $\overrightarrow{H_z^*}$, а величину $E_{\text{ст}}$ – на соответствующее первичное поле, создаваемое на расстоянии $l_{\text{ГП}}$ моментами M_x , M_y и M_z в направлении его оси.

С учетом формул (3.1) и (3.6) первичные поля равны

$$M_x / (2\pi l_{\text{ГП}}^3) = M_y / (2\pi l_{\text{ГП}}^3) = M_z / (2\pi l_{\text{ГП}}^3).$$

В результате имеем

$$\begin{cases} G_{xx} = -\pi \frac{l_{\text{ГП}}^3}{M_x} H_{xx}^*; G_{yy} = -\pi \frac{l_{\text{ГП}}^3}{M_y} H_{yy}^*; \\ G_{zz} = -\pi \frac{l_{\text{ГП}}^3}{M_z} H_{zz}^*; G_{yz} = -\pi \frac{l_{\text{ГП}}^3}{M_y} H_{yz}^*; \\ G_{zy} = -\pi \frac{l_{\text{ГП}}^3}{M_z} H_{zy}^*. \end{cases} \quad (3.18)$$

Искомые проекции векторов, $\overrightarrow{H'_y}$ и $\overrightarrow{H'_z}$ получаются при подстановке выражения (3.18) и (3.4) в равенство (3.17):

$$\begin{cases} H'_{xx} = G_{xx} \frac{M_x}{2\pi l_{\Gamma\Pi}^3} \chi'; H'_{yy} = G_{yy} \frac{M_y}{2\pi l_{\Gamma\Pi}^3} \chi'; \\ H'_{zz} = G_{zz} \frac{M_z}{2\pi l_{\Gamma\Pi}^3} \chi'; H'_{yz} = G_{yz} \frac{M_y}{2\pi l_{\Gamma\Pi}^3} \chi'; \\ H'_{zy} = G_{zy} \frac{M_z}{2\pi l_{\Gamma\Pi}^3} \chi'. \end{cases} \quad (3.19)$$

Проекция поля \vec{H}' на ось приемной катушки индуцирует ЭДС ΔE , обусловленную влиянием среды. Ее значение выразим в единицах максимальной ЭДС $E_{0\max}$, которую можно измерить в воздухе, если катушки расположить соосно на расстоянии $l_{\Gamma\Pi}$ друг от друга. Тогда, на основе формул (3.19), имеем

$$\Delta E / E_{0\max} = G_M^* \chi', \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \text{где } G_M^* = G_{xx} \cos\alpha_x^{(1)} \cos\alpha_x^{(2)} + G_{yy} \cos\alpha_y^{(1)} \cos\alpha_y^{(2)} + G_{zz} \cos\alpha_z^{(1)} \cos\alpha_z^{(2)} + \\ + G_{yz} \cos\alpha_y^{(1)} \cos\alpha_z^{(2)} + G_{zy} \cos\alpha_z^{(1)} \cos\alpha_y^{(2)}; \end{aligned} \quad (3.21)$$

$\alpha_x^{(1)}, \alpha_y^{(1)}, \alpha_z^{(1)}$ и $\alpha_x^{(2)}, \alpha_y^{(2)}, \alpha_z^{(2)}$ – углы, образованные осями генераторной и приемной катушек с осями координат.

Измеряемая в воздухе ЭДС E_0 при данном расположении катушек меньше $E_{0\max}$ в $\Gamma = E_{0\max} / E_0$ раз, причем

$$\frac{1}{\Gamma} = \frac{1}{2} \left(-\cos\alpha_x^{(1)} \cos\alpha_x^{(2)} - \cos\alpha_y^{(1)} \cos\alpha_y^{(2)} + 2\cos\alpha_z^{(1)} \cos\alpha_z^{(2)} \right). \quad (3.22)$$

Если ЭДС в воздухе не равна нулю, то ее целесообразно использовать для градуировки аппаратуры контроля, тогда справедливы равенства

$$\Delta E / E_0 = G_M \chi'; \quad G_M = \Gamma G_M^*. \quad (3.23)$$

Из формул (3.20)–(3.23) следует, что любой зонд характеризуется геометрическими факторами G_{xx} , G_{yy} , G_{zz} , G_{yz} и G_{zy} совокупность которых образует тензор второго ранга с компонентами $G_{xy} = G_{xz} = G_{yx} = G_{zx} = 0$.

Для определения тензора геометрических факторов вычисляют потенциалы φ_x^* , φ_y^* и φ_z^* соответствующих отраженных диполей для основных вариантов расположения катушек, приведенных на рисунке 3.1.

Потенциал отраженного диполя с моментом $M_x^* = M_z$ составляет

$$\varphi_x^* = \frac{M_x(x-x^*)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}}, \quad (3.24)$$

где x, y, z – координаты точки наблюдения;

x^*, y^*, z^* – координаты отраженного источника, причем

$$x^* = 0; y^* = -2h\cos\beta; z^* = -2h\sin\beta. \quad (3.25)$$

Диполь с моментом M_y имеет нормальную к поверхности компоненту $M_n = M_y\cos\beta$ и касательную $M_t = M_y\sin\beta$. Нормальная компонента при отражении изменяет знак ($M_n^* = -M_n$), а касательная остается неизменной ($M_t^* = M_t$). Отсюда находятся проекции момента отраженного источника, а затем его потенциал

$$\varphi_y^* = -\frac{M_y(\cos 2\beta(y-y^*) + \sin 2\beta(z-z^*))}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}}. \quad (3.26)$$

Для диполя с магнитным моментом M_z справедливы равенства $M_n = M_z\sin\beta$; $M_t = M_z\cos\beta$ и $M_y^* = -2M_z\cos\beta\sin\beta$; $M_z^* = M_z(\cos^2\beta - \sin^2\beta)$. Используя их, можно найти потенциал отраженного диполя в виде

$$\Phi_z^* = -\frac{M_z(-\sin 2\beta(y-y^*) + \cos 2\beta(z-z^*))}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}}. \quad (3.27)$$

Необходимые компоненты магнитных полей получаются посредством дифференцирования формул (3.24), (3.26) и (3.27):

$$H_{xx}^* = -\frac{\partial\Phi_x^*}{\partial x} = \frac{M_x\left(2(x-x^*)^2 - (y-y^*)^2 - (z-z^*)^2\right)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{5/2}}; \quad (3.28)$$

$$H_{yy}^* = -\frac{\partial\Phi_y^*}{\partial y} = \frac{M_y \cos 2\beta}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}} - \frac{3M_y(\cos 2\beta(y-y^*) + \sin 2\beta(z-z^*)) \cdot (y-y^*)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{5/2}}; \quad (3.29)$$

$$H_{zz}^* = -\frac{\partial\Phi_z^*}{\partial z} = -\frac{M_z \cos 2\beta}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}} + \frac{3M_z(-\sin 2\beta(y-y^*) + \cos 2\beta(z-z^*)) \cdot (z-z^*)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{5/2}}; \quad (3.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{yz}^* = -\frac{\partial\Phi_y^*}{\partial z} = \frac{M_y \sin 2\beta}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}} - \frac{3M_y(\cos 2\beta(y-y^*) + \sin 2\beta(z-z^*)) \cdot (z-z^*)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{5/2}}; \\ H_{zy}^* = -\frac{\partial\Phi_z^*}{\partial y} = \frac{M_z \sin 2\beta}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{3/2}} + \frac{3M_z(-\sin 2\beta(y-y^*) + \cos 2\beta(z-z^*)) \cdot (y-y^*)}{4\pi\left((x-x^*)^2 + (y-y^*)^2 + (z-z^*)^2\right)^{5/2}}. \end{array} \right. \quad (3.31)$$

В формулах (3.28)–(3.31) при $x = y = 0$; $z = l_{\Gamma\Pi}$ координаты x^* , y^* , z^* заменяют в соответствии с равенствами (3.25). Подставляя эти формулы в выражения (3.18), получают следующие представления геометрических факторов:

$$G_{xx} = 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}}; \quad (3.32)$$

$$G_{yy} = 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}} \times \\ \times \left\{ 1 + \cos^2\beta - 3\cos^2\beta \cdot \left[1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right\}; \quad (3.33)$$

$$G_{zz} = 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}} \times \\ \times \left\{ 1 + \sin^2\beta - 3\cos^2\beta \cdot \left[1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right\}; \quad (3.34)$$

$$G_{yz} = \cos\beta \cdot 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}} \times \\ \times \left\{ \sin\beta + 3 \left(\sin\beta + \frac{2h}{l_{\Gamma\Pi}} \right) \cdot \left[1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right\}; \quad (3.35)$$

$$G_{zy} = \cos\beta \cdot 0,25 \left\{ 1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{-3}{2}} \times \\ \times \left\{ \sin\beta - 3 \left(\sin\beta + \frac{2h}{l_{\Gamma\Pi}} \right) \cdot \left[1 + 4 \left[\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \sin\beta + \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \right] \right]^{-1} \right\}. \quad (3.36)$$

Вычисленные по формулам (3.32)–(3.36) зависимости G_{xx} , G_{yy} , G_{zz} , G_{yz} и G_{zy} от отношения $l_{\text{гп}}/h$ представлены на рисунке 3.2.

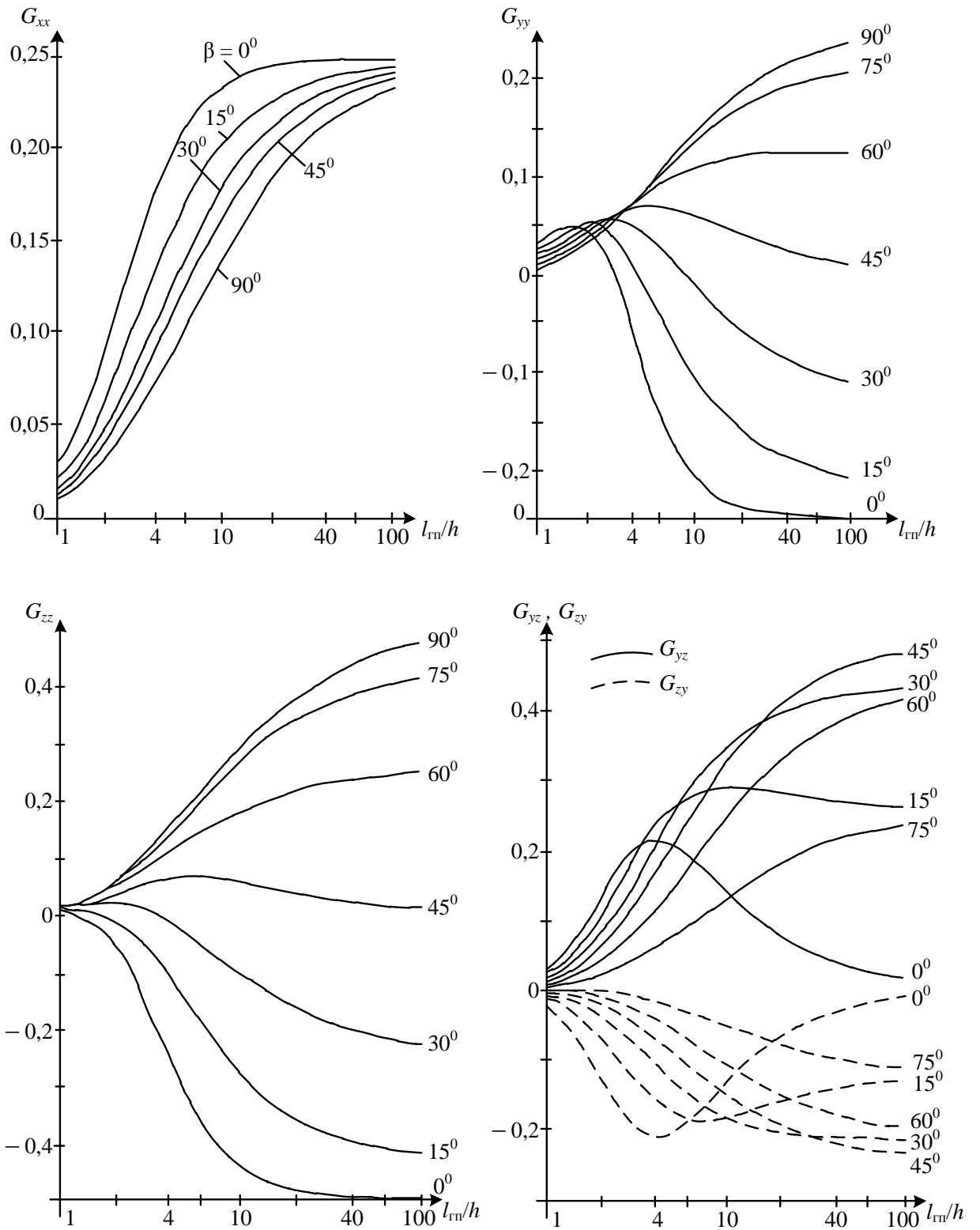


Рисунок 3.2 – Кривые геометрических факторов для плоской поверхности

Геометрический фактор G_{xx} зонда с катушками, параллельными друг другу и плоскости раздела, монотонно возрастает с ростом отношения $l_{\Gamma\Pi}/h$ и уменьшения β . При отношении $l_{\Gamma\Pi}/h \rightarrow \infty$ кривые стремятся к одному значению $G_{xx} = 0,25$. Раньше всех на асимптоту выходит кривая горизонтального зонда ($\beta = 0^0$), а позже всех – кривая вертикального зонда ($\beta = 90^0$). При значениях $\Gamma = -2$ и $G_M = -2G_{xx}$ и выполнении условий $l_{\Gamma\Pi}/h \rightarrow \infty$ и $\chi \rightarrow \infty$ приращение $\Delta E \rightarrow -E_0$, поэтому измеряемая ЭДС $E = E_0 + \Delta E$ уменьшается до нуля.

Функция G_{yy} зонда, катушки которого параллельны друг другу и ортогональны поверхности раздела, при $\beta = 0^0$ сначала увеличивается, достигая небольшого максимума, а затем монотонно убывает и стремится к значению $G_{yy} = -0,25$. С ростом угла β максимумы и асимптоты кривых смещаются вверх. Начиная с $\beta = 45^0$ значения G_{yy} становятся положительными, а при $\beta \geq 60^0$ у кривых пропадают максимумы.

Из-за отрицательного знака коэффициента $\Gamma = -2$ при $G_{yy} > 0$ происходит ослабление потока приемной катушки, а при $G_{yy} < 0$ – его усиление, так как $G_M = -2G_{yy}$. В предельном случае ($l_{\Gamma\Pi}/h \rightarrow \infty$ и $\chi \rightarrow \infty$) ЭДС вертикального зонда убывает до нуля, а ЭДС горизонтального увеличивается вдвое.

Функции G_{xx} и G_{yy} согласно формулам (3.21) и (3.23) можно рассматривать в качестве предельных выражений геометрического фактора зонда с параллельными катушками, которые лежат в плоскости, образующей угол β с поверхностью раздела, поэтому геометрический фактор определяется в виде

$$G_M = -2(G_{xx} \cos^2 \beta + G_{yy} \sin^2 \beta). \quad (3.37)$$

Кривые геометрических факторов G_{zz} осесимметричного зонда похожи на графики G_{yy} (рис. 3.2). Однако здесь $\Gamma = 1$ и $G_M = G_{zz}$, поэтому при $G_{zz} < 0$ происходит уменьшение ЭДС под влиянием среды, а при $G_{zz} > 0$ – увеличение.

Наибольший экранирующий эффект наблюдается у горизонтального зонда, а наибольшее усиление поля – у вертикального.

Геометрический фактор Т-образного зонда (рис. 3.2) с взаимно перпендикулярными катушками, ортогональными поверхности контролируемой раздела положителен, если зонд наклонен так, что ближайшей к поверхности оказывается катушка, перпендикулярная к оси зонда (G_{yz}). В противном случае фактор G_{zy} отрицателен. Различие в знаках сохраняется и при $\beta = 0^0$, хотя факторы $G_{yz} = |G_{zy}|$ описывают один и тот же зонд. Это можно объяснить тем, что после перестановки нижних индексов у фактора G_{yz} или G_{zy} необходимо переходить к другой системе отсчета с противоположным направлением оси z .

Графики G_{yz} и G_{zy} при углах наклона $\beta = 0^0$ и $\beta = 15^0$ имеют экстремумы, а их абсолютные значения которых максимальны при $\beta = 45^0$. В этом случае оси катушек при $l_{\Gamma\Pi}/h \rightarrow \infty$ располагаются или вдоль линии, соединяющей их центры ($G_{yz} \rightarrow 0,5$), или же перпендикулярно к этой линии ($G_{zy} \rightarrow -0,25$).

Если плоскость системы наклонена под углом β к поверхности раздела, то геометрические факторы изменяются в соответствии с формулой

$$G_M = G_{yz} \sin \beta; G_M = G_{zy} \sin \beta. \quad (3.38)$$

Наиболее близкую к асимптотической характеристику имеет горизонтальный зонд с параллельными катушками. При его длине $l_{\Gamma\Pi} = 20h$ вариация высоты $\delta h = h$ изменяет среднее значение $G_{xx} = 0,241$ на 2 %. При сужении диапазона до $\delta h = 0,5h$ отклонение от $G_{xx} = 0,245$ ограничивается значением 1 %. Небольшие погрешности измерения кажущейся восприимчивости при $\chi \leq 0,1$, а в случае измерений больших значений χ они возрастают примерно в 5 – 7 раз.

Ошибки измерений возникают также из-за наклона оси зонда на угол $\delta\beta$ и его поворота вокруг оси на угол $\delta\alpha$. Наибольший угол $\delta\beta = \delta h/l_{\Gamma\Pi}$ получится,

если на высоту h поднимется только одна из катушек. Изменение фактора G_{xx} в этом случае меньше, чем когда на ту же высоту передвигаются обе катушки. Согласно уравнению (3.37), поворот на угол $\delta\beta = \delta h/l_{\Gamma\Pi}$ приводит к отклонению $\delta G_{xx}/G_{xx} = 2(\delta h)^2/l_{\Gamma\Pi}^2$, что составляет 0,5 % при $l_{\Gamma\Pi} = 20h$ и $\delta h = h$.

Влияние еще одного мешающего фактора – конечных размеров катушек – практически исключается при калибровке приборов по ЭДС E_0 . Погрешность из-за влияния размеров катушек при этом случае можно оценить из равенства

$$\frac{\delta G_{xx}}{G_{xx}} = 2 \left(\frac{h}{l_{\Gamma\Pi}} \right)^2 \left\{ 2 - \frac{l^2}{l_{\Gamma\Pi}^2} \left[\left(1 + \frac{l^2}{l_{\Gamma\Pi}^2} \right) \left(\sqrt{1 + \frac{l^2}{l_{\Gamma\Pi}^2}} - 1 \right) \right]^{-1} \right\}, \quad l_{\Gamma\Pi} \gg h, \quad (3.39)$$

где l – длина катушек; $l_{\Gamma\Pi}$ – расстояние между катушками.

Значения $\delta G_{xx}/G_{xx}$ даже при $l = 0,5l_{\Gamma\Pi}$ и $0,33l_{\Gamma\Pi}$ составляют 0,4 и 0,3 % соответственно. Значительное расширение области применимости объясняется однотипностью измеряемого и градуировочных полей параллельных катушек, благодаря чему асимптотическое значение G_M не зависит от размеров катушек.

Горизонтальный зонд с соосными катушками характеризуется большими погрешностями $\delta\chi'$ из-за вариаций δh и $\delta\beta$, которые в 1,6 и 3,5 раза больше.

К малым изменениям геометрии нечувствительны также установки с характеристиками, имеющими экстремумы. В Т-образной установке длиной $l_{\Gamma\Pi} = 8h$, которая наклонена на 15° в сторону катушки, лежащей на ее оси, геометрический фактор вблизи минимума отклоняется от значения $|G_M| = 0,188$ меньше, чем на 1 %, когда h увеличивается в пределах 30 %. По сравнению с "асимптотическими" системами длина у Т-образного зонда (рис. 3.1) может быть вдвое меньше, но при этом сокращается допустимый интервал измерения h .

Наименьшую длину $l_{\Gamma\Pi} = 1,8h$ имеет зонд с катушками, перпендикулярными к поверхности (рис. 3.1). Его характеристика в окрестностях максимума

устойчива к изменениям δh , $\delta\beta$ и $\delta\alpha$, причем $\delta G_{yy}/G_{yy} = 1,6(\delta\alpha)^2$. При сближении катушек значение $|G_M| = 2G_{yy}$ уменьшается до 0,1. Точное значение G_M должно определяться экспериментальным способом с учетом длин и диаметров катушек. Благодаря компактному размещению катушек этот зонд можно применять для измерений на образцах с ограниченными размерами плоских граней.

3.2 Модель измерительного зонда с различным расположением генераторной и приемной катушек

Представленный выше анализ зависимостей геометрического фактора показал, что для повышения измеряемой ЭДС в сильномагнитных средах следует использовать зонды, имеющие экстремумы на характеристике (рис. 3.2). Таким является зонд, катушки которого параллельны друг другу и ортогональны исследуемой поверхности руды. Нелинейную зависимость геометрического фактора от величины зазора между зондом и поверхностью руды учитывают при градуировке шкалы средств измерений с помощью поправочных коэффициентов (табл. 1.4).

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

Уровень электромагнитного воздействия генераторной катушки на приемную катушку определяется с учетом взаимной индуктивности и геометрического расположения приемной катушки относительно генераторной катушки.

Известно, что катушка индуктивности с квадратной площадью сечения обмоток обладает наибольшей индуктивностью L , если отношение среднего диаметра d обмотки к длине a катушки составляет $d \approx 3a$. 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. 3.3, а) их взаимная индуктивность определяется по формуле [51]

$$M = kL = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 8,497w^2kd, \quad (3.40)$$

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.

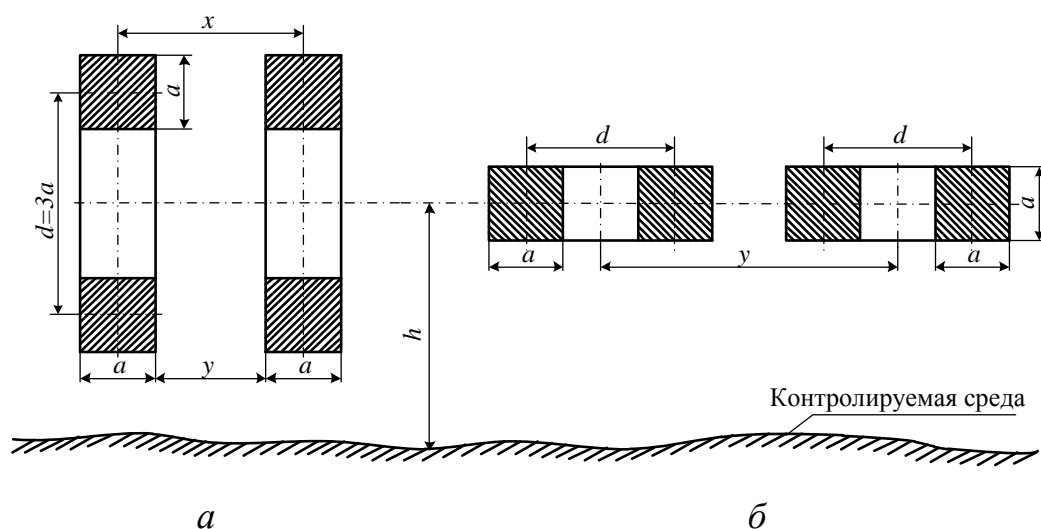


Рисунок 3.3 – Расположение катушек индуктивности квадратного сечения:
 a – соосно друг другу; b – параллельно друг другу

Взаимная индуктивность катушек, удаленных на значительное расстояние друг от друга ($y > 2a$), определяется методом эквивалентных круговых контуров [51], согласно которому каждую катушку индуктивности заменяют одиночным контуром, имеющим эквивалентный диаметр

$$d_1 = d(1 + a^2/6d^2) = d(1 + 1/54) = 1,01852d. \quad (3.41)$$

Взаимная индуктивность M_1 двух таких контуров, расположенных соосно на расстоянии $x = y + a$ друг от друга, рассчитывается по типовой формуле [51]

$$M_1 = w^2M_l. \quad (3.42)$$

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

$$M_l = \frac{\mu_0 \pi R}{16} \gamma^3 \left(1 - \frac{3}{4} \gamma^2 + \frac{75}{128} \gamma^4 - \frac{245}{512} \gamma^6 + \frac{6615}{16384} \gamma^8 - \dots \right), \quad (3.43)$$

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

Взаимная индуктивность катушек с прямоугольной площадью сечения обмоток с параллельными осями (рис. 3.3, б) вычисляется по формуле:

$$M_2 = \frac{\pi}{32} \mu_0 w^2 \frac{d^4}{a^4} \left(\frac{Z_1}{b_1} - \frac{Z_2}{y} \right), \quad (3.44)$$

где d и a – соответственно средний диаметр и длина катушек, м;

$b_1 = \sqrt{a^2 + y^2}$; y – расстояние между осями катушек, м;

$$Z_1 = \rho_2^2 - \frac{1}{2} \alpha_1^2 \rho_2 \rho_4 P_2(\gamma_1) + \frac{1}{8} \alpha_1^4 (2\rho_6 \rho_2 + 3\rho_4^2) P_4(\gamma_1) - \frac{5}{32} \alpha_1^6 (\rho_8 \rho_2 + 6\rho_6 \rho_4) P_6(\gamma_1) + \dots$$

– расчетный параметр;

$$\text{где } \rho_n = 1 + \frac{n(n-1)}{3!} \rho^2 + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{5!} \rho^4 + \dots + \frac{n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1}{(n+1)!} \rho^n;$$

$$\alpha_1 = d/2b_1; P_n(\gamma) = \frac{1}{2^n (n)!} \frac{d^n}{d\gamma^n} (\gamma^2 - 1)^n \text{ – сферические функции Лежандра } n\text{-го}$$

порядка; 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 $\alpha_2 = d/(2b_2) = d/(2y)$.

При теоретических исследованиях с использованием программной среды *Mathcad* проведен расчет взаимной индуктивности двух катушек, имеющих одинаковое число витков $w_1 = 1000$, $w_2 = 2000$, $w_3 = 3000$ и различные геометрические размеры: $a_1 = 0,005$ м, $a_2 = 0,01$ м, $a_3 = 0,02$ м при изменении расстояния между ними в диапазоне $y = (0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3)$ м.

В результате исследований получены расчетные зависимости взаимной индуктивности катушек от расстояния между ними при их соосном и параллельном размещении относительно друг друга. 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 (рис. 3.4).

Параллельное размещение катушек индуктивности в конструкции зонда приводит к уменьшению взаимной индуктивности примерно в два раза по сравнению с соосным расположением катушек. 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.

На основании проведенных расчетов 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 сохранении экспоненциальной зависимости ее спада при увеличении расстояния y между катушками.

Анализ полученных зависимостей взаимной индуктивности от расстояния между катушками (рис. 3.4) 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, а форма зависимости взаимной индуктивности от расстояния между катушками остается экспоненциальной.

Таким образом, расчет взаимной индуктивности генераторной и приемной катушек по предложенным моделям (3.40) и (3.44) позволил установить основные закономерности влияния числа витков w , геометрических размеров a и расстояния между ними y на чувствительность измерительного зонда.

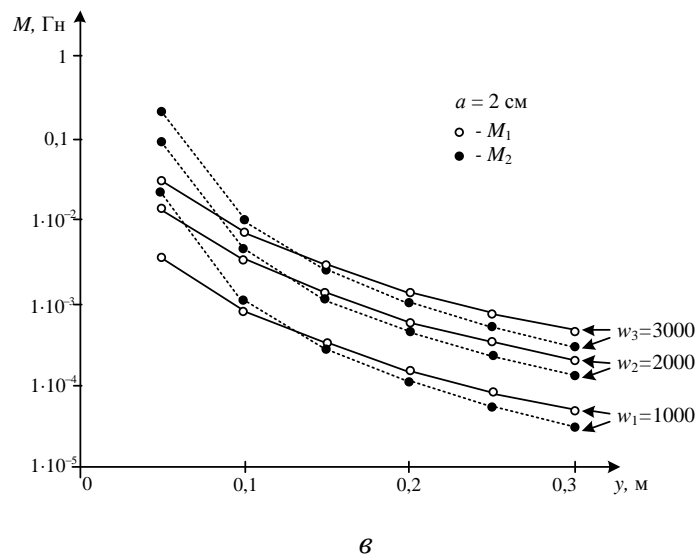
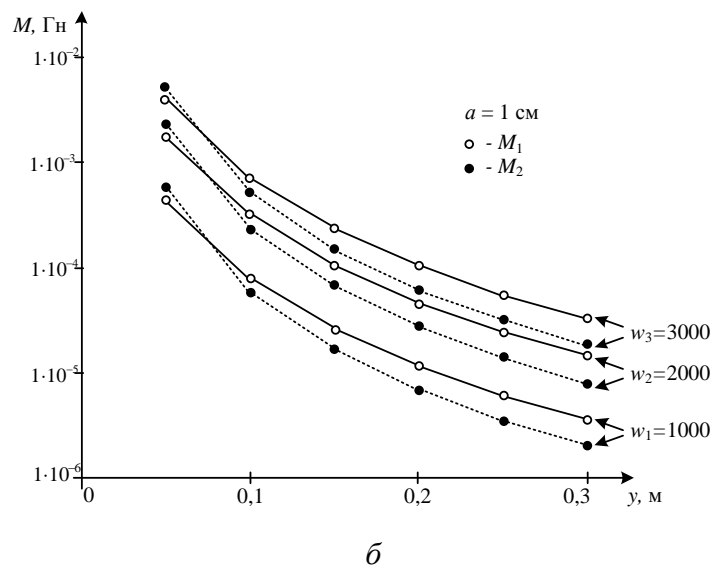
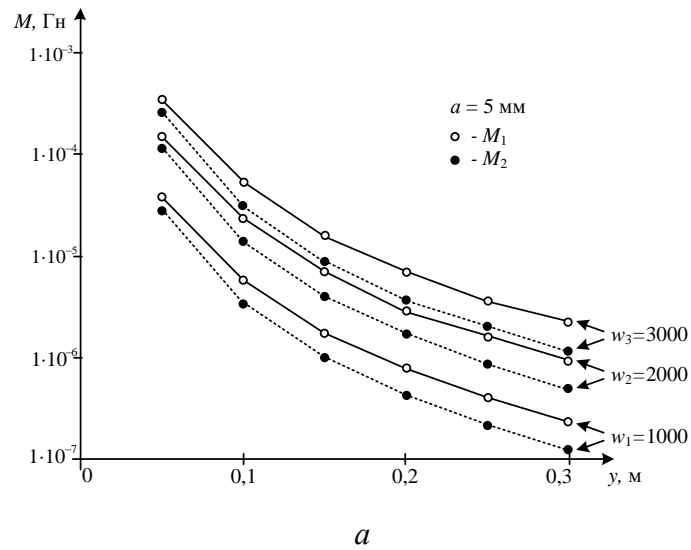


Рисунок 3.4 – Зависимости взаимной индуктивности катушек с различными геометрическими размерами от расстояния между ними при их соосном (M_1) и параллельном (M_2) размещении

Изменение зазора между зондом и рудной массой может привести к снижению точности индукционного метода контроля за счет субъективной погрешности. На точность измерения также влияет методическая погрешность, обусловленная волнообразной зависимостью чувствительности прибора от величины зазора между зондом и поверхностью руды (рис. 3.5). Данная зависимость получена на основании расчетов по выражению (3.33) для двухкатушечного зонда с линейными размерами $l_{ГП}$ при размещении катушек зонда параллельно друг другу и ортогонально поверхности среды на расстоянии h от нее.

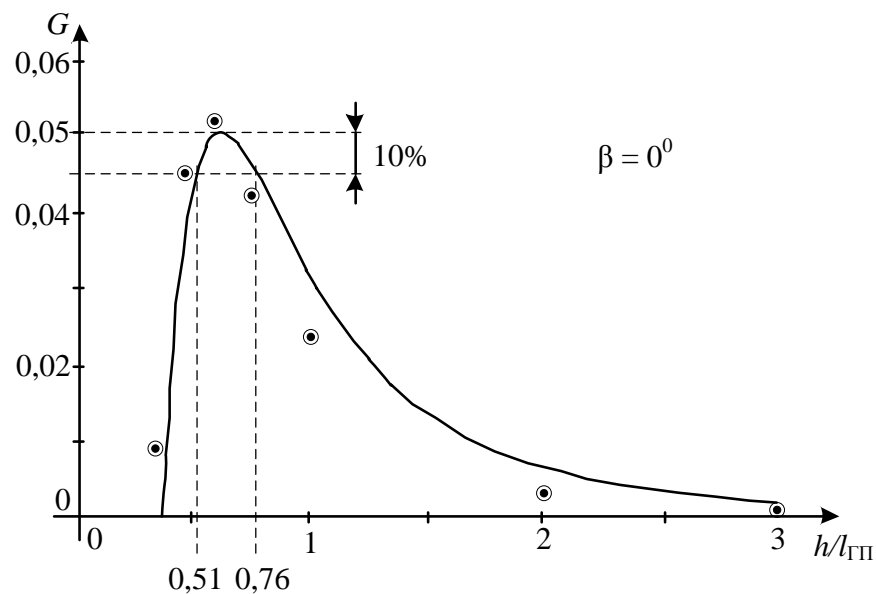


Рисунок 3.5 – Зависимость геометрического фактора от параметров $l_{ГП}$, h и β двухкатушечного зонда

Максимальное значение коэффициента чувствительности зонда G зависит от расстояния $l_{ГП}$ между генераторной и приемной катушками индуктивности и достигается при высоте $h_{опт} \approx 0,6l_{ГП}$ зонда над поверхностью руды. При этом разностная ЭДС ΔE двухкатушечного зонда (рис. 1.3) при фиксированном расстоянии между генераторной и приемной катушками достигает максимума при оптимальной величине зазора между зондом и поверхностью исследуемой среды $h_{опт}$. Приближение зонда к среде или неровность ее поверхности уменьшают чувствительность прибора и приводят к увеличению погрешности измерения.

Если погрешность от изменения высоты h и неровностей поверхности составляет 10 %, то допустимый диапазон изменения высоты при номинальном геометрическом факторе $G = 0,045$ простирается от $h_1 = 0,5l_{\text{ГП}}$ до $h_2 = 0,76l_{\text{ГП}}$.

3.3 Метод резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

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 $l_{\text{к1}} = 0,2l_{\text{ГП}}$ и $l_{\text{к2}} = 0,8l_{\text{ГП}}$ от генераторной катушки позволяет уменьшить влияние величины зазора h между зондом и поверхностью исследуемой среды. При этом зависимость чувствительности устройства от величины зазора между зондом и поверхностью среды при угле $\beta = 0^\circ$ между ними аппроксимируется следующими выражениями

$$G_1 = 0,245 \left[\frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{\text{ГП}})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{\text{ГП}}^2} \right) - \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{\text{к1}})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{\text{к1}}^2} \right) \right], \quad (3.45)$$

$$G_2 = \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{\text{ГП}})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{\text{ГП}}^2} \right) - \frac{0,5}{\sqrt[3]{1 + 4(h/l_{\text{к2}})^2}} \cdot \left(2 - \frac{3}{1 + 4h^2/l_{\text{к2}}^2} \right), \quad (3.46)$$

где h – величина зазора между зондом и поверхностью исследуемой среды;

$l_{\text{ГП}}$ – расстояние от генераторной до измерительной катушки;

$l_{\text{к1}}, l_{\text{к2}}$ – расстояния от генераторной до компенсационных катушек.

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. 3.6).

Схемная реализация соответствующего устройства контроля представлена на рисунке 3.7, а вариант размещения генераторной, двух компенсационных и приемной катушек в измерительном зонде – на рисунке 3.8.

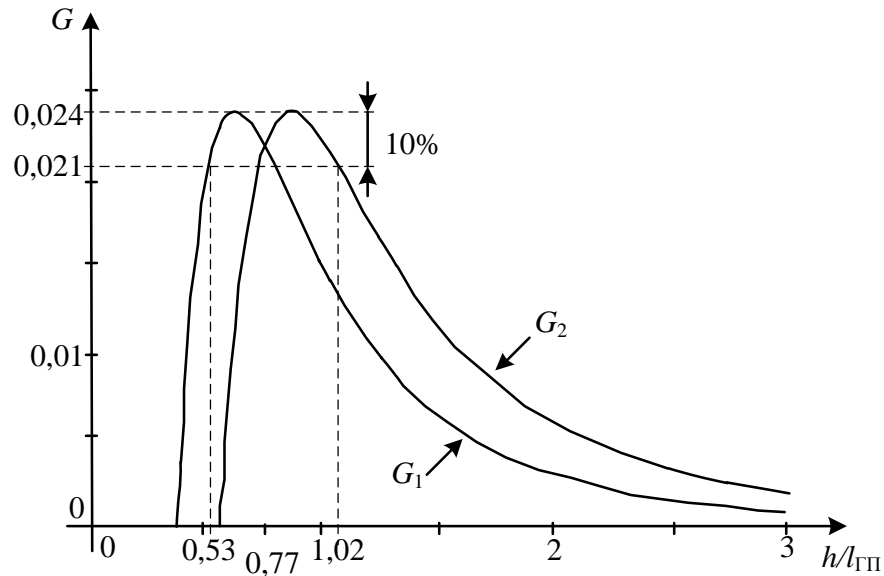


Рисунок 3.6 – Зависимость геометрического фактора от $l_{ГП}$, h зонда с дополнительными компенсационными катушками

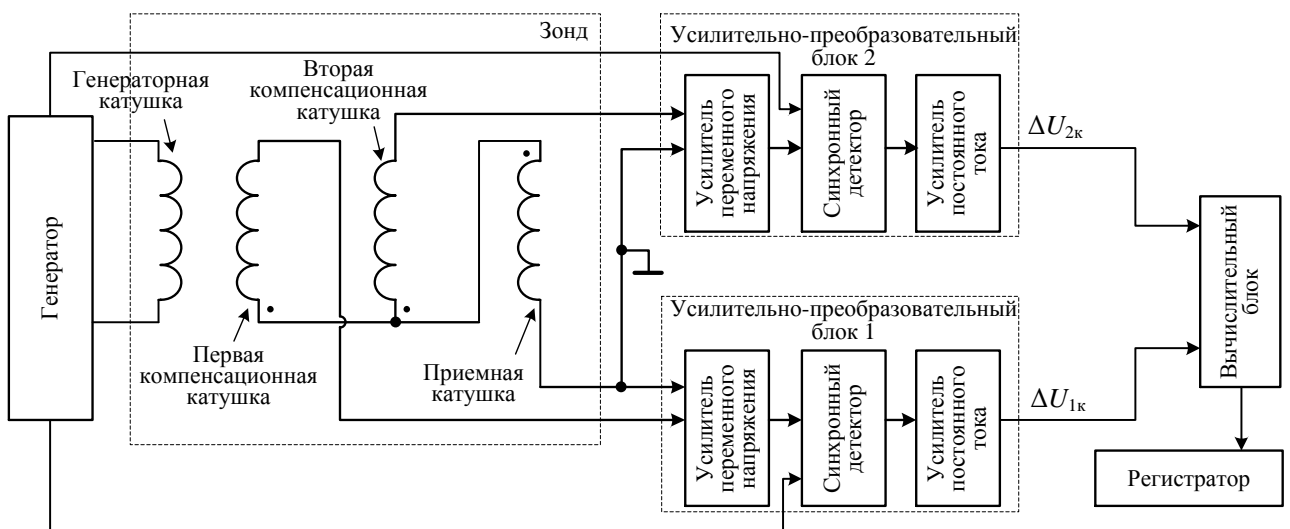


Рисунок 3.7 – Вариант схемной реализации устройства с дополнительными компенсационными катушками

К недостаткам данного устройства относятся малая амплитуда сигналов на приемной и компенсационных катушках, а также резкое уменьшение чувствительности прибора при отклонениях $\pm \Delta h$ зонда от оптимальной величины зазора между зондом $h_{\text{опт}} = 0,77l_{\text{ГП}}$ (рис. 3.6) и поверхностью исследуемой среды.

В частности, при подаче синусоидального напряжения с частотой 1 кГц и амплитудой 50 В на генераторную катушку значение ЭДС на приемной и компенсационных катушках в воздушной среде составляет не более 20,5 мВ [41],

т.е. примерно в $\frac{50}{20,5 \cdot 10^{-3}} = 2400$ раз меньше при одинаковом числе витков в

генераторной и приемной катушках. При этом диапазон измеряемого напряжения составляет несколько милливольт, что практически ограничивает точность контроля магнитной восприимчивости из-за влияния инструментальных погрешностей прибора и воздействия внешних наводок и помех.

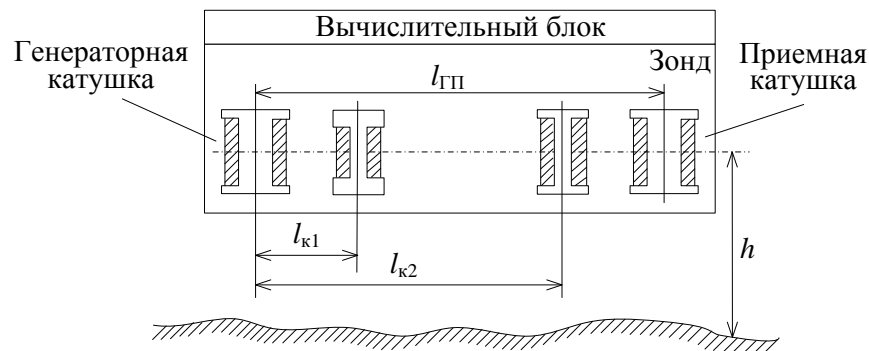


Рисунок 3.8 – Вариант размещения генераторной, двух компенсационных и приемной катушек в зонде

Второй вариант повышения точности измерения и чувствительности приборов контроля магнитной восприимчивости руды можно обеспечить за счет увеличения приращения $\Delta E/E_0$ ЭДС на приемной катушке [42].

Возможность повышения чувствительности измерительного зонда основана на известных из физики магнитного поля соотношениях между индукцией B , напряженностью H и магнитным потоком Φ [54].

В частности, напряженность магнитного поля H_M , создаваемого генераторной катушкой индуктивности с числом витков w_Γ , пропорциональна протекающему по виткам току I_Γ и определяется формулой:

$$H_M = w_\Gamma I_\Gamma. \quad (3.47)$$

Индукция магнитного поля прямо пропорциональна его напряженности H_M и зависит от магнитной проницаемости μ_0 вакуума и относительной магнитной проницаемости $\mu_\phi \gg 1$ сердечника: $B = \mu_0 \mu_\phi H_M$.

Магнитный поток $\Phi_0 = BS_\Gamma$, создаваемый генераторной катушкой, зависит от площади S_Γ ее поперечного сечения и индукции B , и с учетом (3.47) пропорционален числу витков w_Γ и току I_Γ генераторной обмотки:

$$\Phi_0 = \mu_0 \mu_\phi w_\Gamma I_\Gamma S_\Gamma. \quad (3.48)$$

При питании генераторной катушки от источника переменного напряжения $U_\Pi = U_M \sin \omega t$ амплитуда намагничивающего тока ограничивается комплексным сопротивлением $\dot{Z}_\Gamma = j\omega L_\Gamma + R_{\text{пр}}$ катушки, зависящим от ее индуктивности L_Γ и активного сопротивления $R_{\text{пр}}$ провода обмотки, поэтому ток:

$$I_\Gamma = U_M / \sqrt{\omega^2 L_\Gamma^2 + R_{\text{пр}}^2}. \quad (3.49)$$

При постоянной угловой частоте переменного напряжения $\omega = \text{const}$ индуктивность генераторной катушки пропорциональна квадрату витков $L_\Gamma \sim w_\Gamma^2$, а введение в катушку ферромагнитного сердечника с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu_\phi \gg 1$ увеличивает ее индуктивность в μ_ϕ раз.

Следовательно, для получения необходимого магнитного потока Φ_r при невысоком питающем напряжении следует применять генераторную катушку с большим числом витков w_r и без ферромагнитного сердечника, который повышает индуктивное сопротивление и уменьшает ток намагничивания I_r катушки.

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_r переменного намагничивающего тока

$$E \sim -L'I_r.$$

При этом ЭДС самоиндукции приемной катушки $E \sim -L_{II} I_{II}$ зависит от ее индуктивности L_{II} и амплитуды I_{II} протекающего в ней переменного тока. Если учесть, что значение переменного тока I_{II} в приемной катушке определяется влиянием магнитного потока Φ_0 , формируемого генераторной катушкой, то для повышения ЭДС на приемной катушке необходимо увеличивать ее индуктивность L_{II} . Известны два способа повышения индуктивности – увеличение числа витков обмотки w_r и применение ферромагнитного сердечника с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu_{\phi} \gg 1$. Практически намотка катушки с числом витков более $w_r > 1000$ приводит к увеличению ее активного сопротивления и к технологическим трудностям намотки, поэтому наиболее целесообразно для повышения индуктивности применять ферромагнитный сердечник [45, 54].

Второй способ увеличения ЭДС на приемной катушке при фиксированном значении амплитуды I_{II} индуцируемого переменного тока заключается в использовании эффекта резонанса, по аналогии с резонансными контурами, применяемыми в радиотехнике для выделения слабых сигналов, поступающих от антенны. 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. Увеличение сопротив-

ления контура на частоте резонанса ω_p определяется добротностью приемной катушки, зависящей от отношения ее индуктивного и активного сопротивлений

$$Q_{\Pi} = \omega_p L_{\Pi} / R_{\Pi p} \gg 1.$$

Еще одним недостатком известных способов контроля руды является зависимость показаний приборов от величины зазора между зондом и рудной поверхностью из-за нелинейной характеристики геометрического фактора (рис. 3.5). Для устранения этого недостатка предложено использовать автоматическую коррекцию показаний посредством применения ультразвукового датчика расстояния между измерительным зондом и поверхностью контролируемой руды. Учитывая, что разрешающая способность современных ультразвуковых датчиков составляет единицы миллиметров, то использование такой коррекции позволяет реализовать универсальную аппаратуру контроля руды с линейной характеристикой преобразования и упростить процесс опробования за счет исключения необходимости точной установки зонда относительно контролируемой поверхности руды.

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

3.4 Экспериментальные исследования метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа

Экспериментальные исследования выполнялись для выявления следующих функциональных зависимостей:

1) влияния резонансного режима работы на амплитуду напряжения на приемной катушке;

2) чувствительности измерительного зонда при различном расположении катушек относительно друг друга;

3) влияния резонансного режима работы приемной катушки на чувствительность к содержанию железа в составе руды.

Экспериментальные исследования проводились по схеме, приведенной на рисунке 3.9. При одинаковом числе витков $w = 1000$ в генераторной и приемной катушках для обеспечения резонансного режима работы зонда параллельно приемной катушке через ключ S подключался конденсатор с емкостью $C = 0,5$ мкФ. При этом резонансная частота выбиралась $f_p = 1140$ Гц.

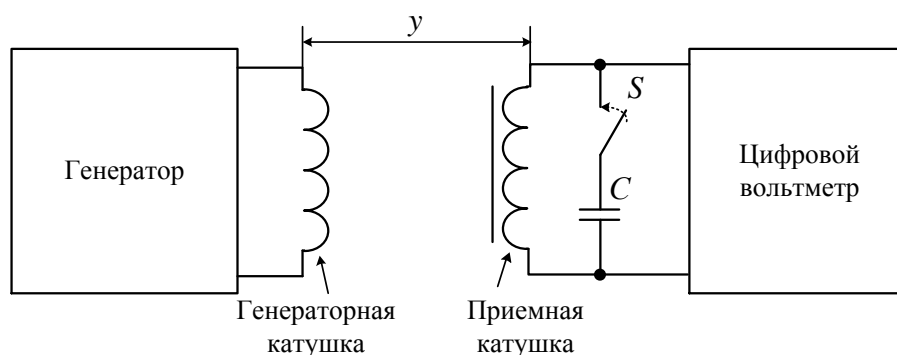


Рисунок 3.9 – Схема проведения экспериментальных исследований

При проведении исследований генераторная и приемная катушки располагались на разном расстоянии друг от друга. На генераторную катушку подавалось синусоидальное напряжение $U_r = 10$ В с частотой $f_r = 1140$ Гц, и цифровым вольтметром измерялось напряжение на приемной катушке индуктивности в следующих случаях: при отсутствии резонансного режима и при подключении резонансного конденсатора C к приемной катушке с ферромагнитным сердечником для получения эффекта резонанса.

При экспериментальных исследованиях использовалась модель, изготовленная из смеси металлических опилок с кварцевым песком в пропорции 50/50, насыпанная в лоток с геометрическими размерами $100 \times 30 \times 30$ см. Подготовка порошковой смеси к измерению двухкатушечной установкой состояла в тщательном перемешивании с последующей утрамбовкой. Индукционный зонд размещался над исследуемой средой на расстоянии $h = 10$ см, а расстояние ме-

жду генераторной и приемной катушками изменялось дискретно от 5 до 30 см. Чтобы исключить влияние неоднородностей, измерения проводились в нескольких точках лотка.

В результате воздействия электромагнитного поля на зажимах приемной катушки индуктивности возникает напряжение взаимной индукции $U_{пр} = M \cdot I_{Г}$ [45], пропорциональное току $I_{Г}$, протекающему по виткам генераторной катушки, и зависящее от взаимной индуктивности M .

На рисунке 3.10 показаны зависимости напряжения на приемной катушке от расстояния y до генераторной катушки, расположенной соосно (рис. 3.3, а), в резонансном режиме работы $U_{рез}$ и без применения резонанса $U_{исх}$.

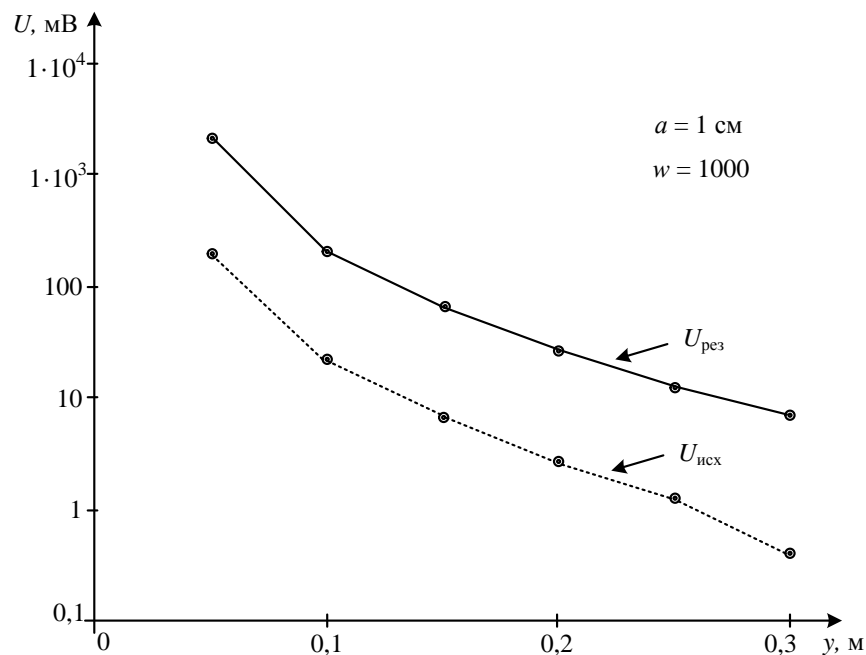


Рисунок 3.10 – Зависимость напряжения на приемной катушке индуктивности от длины зонда в резонансном режиме $U_{рез}$ и без резонансного режима $U_{исх}$

Для оценки чувствительности зонда при различном размещении катушек относительно друг друга были получены зависимости приращения напряжения на приемной катушке от расстояния y до генераторной катушки при их соосном ΔU_1 и параллельном ΔU_2 расположении для двух случаев (рис. 3.11) [64]:

– при измерениях кажущейся магнитной восприимчивости зондом с отключенным конденсатором (в отсутствии резонанса) $\Delta U_{исх1}$, $\Delta U_{исх2}$.

– при измерениях кажущейся магнитной восприимчивости зондом с подключенным конденсатором (в резонансном режиме) $\Delta U_{рез1}$, $\Delta U_{рез2}$.

При этом было учтено, что чувствительность любого индукционного устройства определяется отношением приращения выходной величины U к вызывающему ее изменению измеряемого параметра χ , т.е. $S_x = \Delta U / \Delta \chi$. При постоянной амплитуде сигнала на генераторной обмотке выходным параметром является амплитуда напряжения на измерительной катушке. При поднесении зонда к эталонной рудной массе на фиксированное расстояние $h = 10$ см приращение величины $\Delta \chi = \text{const}$, поэтому по напряжению на измерительной катушке можно сравнивать чувствительность разных по конструкции индукционных преобразователей.

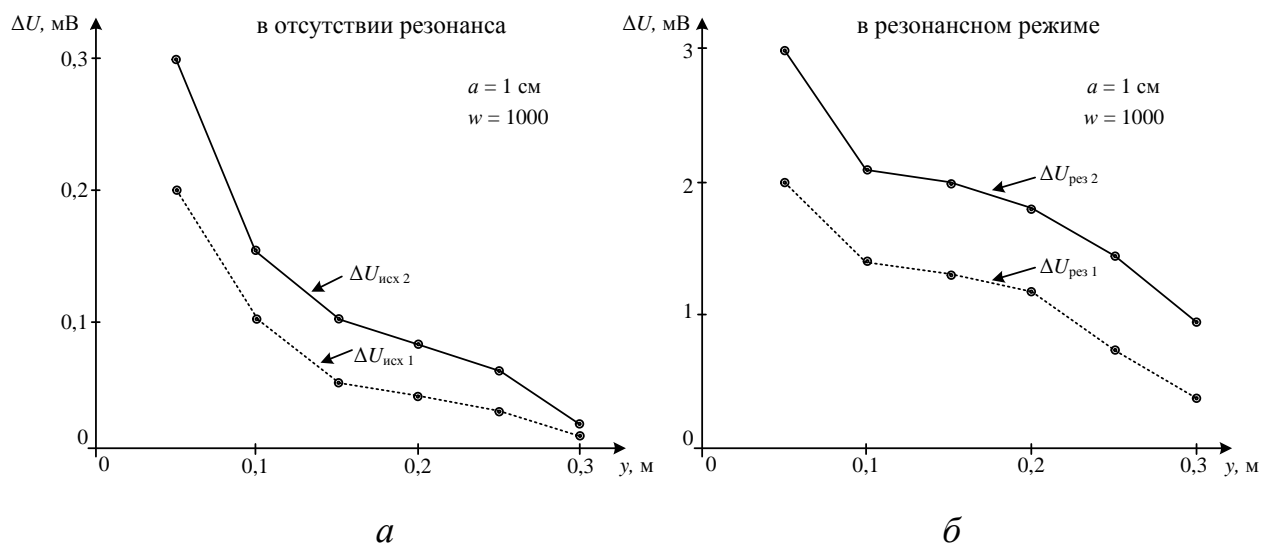


Рисунок 3.11 – Зависимости приращения напряжения на приемной катушке при соосном (а) и параллельном (б) размещении катушек индуктивности при наличии рудной массы и при ее отсутствии

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1) сравнение приращений напряжений на приемной катушке при различном взаимном расположении катушек показывает, что параллельное располо-

жение генераторной и приемной катушек в составе зонда согласно рисунку 3.3, б позволяет примерно в 1,5 раза увеличить чувствительность изменения 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 зондом и исследуемой поверхностью не зависит от режима работы и изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния h^2 между катушками зонда и контролируемым образцом, однако применение резонансного режима работы позволяет увеличить абсолютные значения чувствительности примерно в $\Delta U_{\text{рез}}/\Delta U_{\text{исх}} = 10$ 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 (смесь из 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.

На точность измерения магнитной восприимчивости без ультразвукового датчика расстояния влияет также методическая погрешность из-за волнообразной зависимости чувствительности устройства от геометрического фактора.

Под точностью измерений в общем случае понимается качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, а точность средства измерений – это качество средства измерений, отражающее близость к нулю его погрешностей [53].

Для оценки точности измерений магнитной восприимчивости использовался двухкатушечный зонд, представленный на рисунке 3.9. В работе оценивалось влияние резонансного режима работы на точность измерения кажущейся магнитной восприимчивости с учетом влияния геометрического фактора. При этом использовались значения напряжения, полученные в результате эксперимента, и значения геометрического фактора, полученные в результате теоретического расчета согласно формуле 3.33.

Полученная зависимость магнитной восприимчивости от геометрических размеров зонда показана на рисунке 3.12. Ее анализ показал, что значения кажущейся магнитной восприимчивости в резонансном режиме $\chi'_{рез}$, полученные в результате эксперимента близки к истинному значению $\chi'_{max} = 1,76$ [11]. 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.

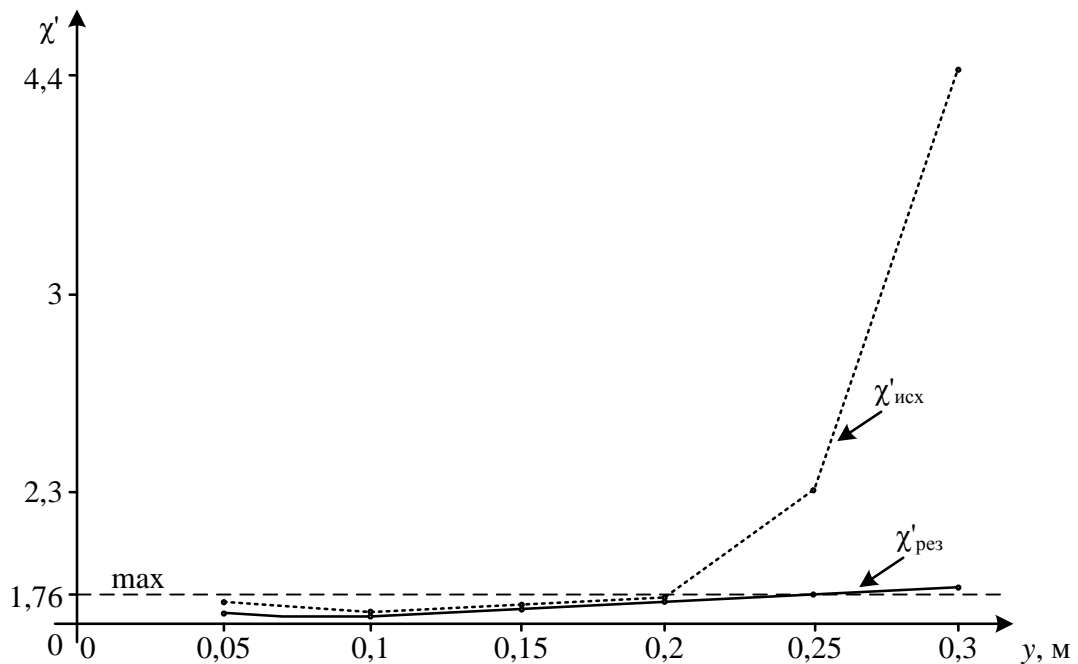


Рисунок 3.12 – Зависимость магнитной восприимчивости от геометрических размеров зонда

$\chi'_{рез}$ – рассчитанная кажущаяся магнитная восприимчивость в резонансном режиме;
 $\chi'_{исх}$ – рассчитанная кажущаяся магнитная восприимчивость в отсутствие резонанса.

Относительная погрешность метода резонансного контроля кажущейся магнитной восприимчивости руды в сравнении с существующим индукционным методом определяется следующим образом (рис. 3.13)

$$\delta = \frac{\chi'_{\max} - \chi'}{\chi'_{\max}}. \quad (3.50)$$

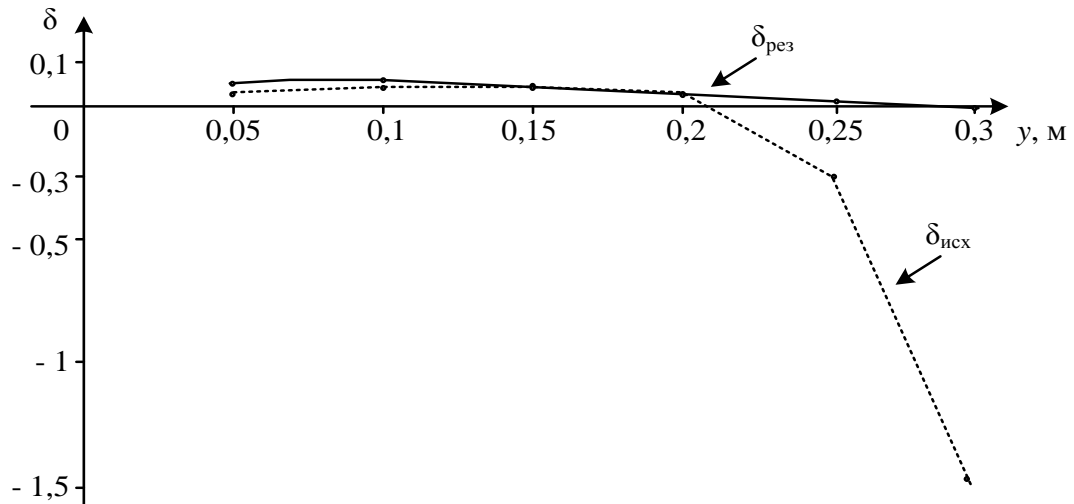


Рисунок 3.13 – Зависимость относительной погрешности измерительного прибора от геометрических размеров зонда

$\delta_{рез}$ – относительная погрешность метода резонансного контроля;

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

Несмотря на применение метода резонансного индукционного контроля кажущейся магнитной восприимчивости рудной массы, значение относительной погрешности приближается к 5 % только на расстояниях между генераторной и приемной катушками 0,25 – 0,3 м. Данные расчеты наглядно показывают, что такой вариант (без использования ультразвукового датчика) сильно зависит от геометрического фактора. Это требует соблюдения конкретной (определенной в процессе калибровки) величины зазора между измерительным зондом и исследуемой средой.

Основная погрешность измерения массовой доли железа в магнетитовой руде δ_{Σ} обусловлена несколькими факторами: погрешностью аналого-цифрового измерения напряжения на приемной катушке (δ_{si}), погрешностью

ультразвукового датчика (δ_d), погрешностью дискретности значений коэффициентов масштабирования, используемых для автоматической линеаризации характеристики преобразования (δ_k) и погрешностью калибровки (δ_{cal}), учитывающей влияние различных факторов (влажности, температуры и т.п.) на индукционный зонд [49, 50]:

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

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.

3.5 Выводы по третьей главе

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

2. В результате проведенных исследований установлено, что значения геометрического фактора, определяющие чувствительность приборов контроля содержания железа в составе руды, нелинейно зависят от взаимного расположения приемной и генераторной катушек и от величины зазора между зондом и контролируемой средой, а также от угла размещения зонда относительно поверхности среды, что приводит к увеличению погрешности измерения.

3. Измерительные зонды с параллельными или соосными генераторной и приемной катушками, размещенными на фиксированном расстоянии в конструкции зонда, имеют близкие по форме геометрические факторы. При этом параллельное расположение генераторной и приемной катушек в составе зонда позволяет примерно в 1,5 раза увеличить чувствительность к изменению содержания железа.

4. Применение резонансного режима работы приемной катушки индуктивности позволяет примерно в 8 раз повысить амплитуду измеряемого сигнала.

5. Разработан 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.

6. Подтверждена экспериментально эффективность применения разработанного метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа в рудной массе на основе моделирования процессов контроля. Применение указанного метода позволяет реализовать средства оперативного опробования руды с погрешностью не более 2,9 % .

4 СРЕДСТВА РЕЗОНАНСНОГО ИНДУКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МАССОВОЙ ДОЛИ ЖЕЛЕЗА В МАГНЕТИТОВОЙ РУДЕ

4.1 Прибор резонансного индукционного контроля качества магнетитовой руды

Применительно к прибору контроля качества руды реализация метода резонансного индукционного контроля сводится к следующему [43]. Во-первых, в приемную и компенсационные катушки вводятся ферромагнитные сердечники с высокой относительной магнитной проницаемостью $\mu \geq 1000$. Во-вторых, к этим катушкам с индуктивностями L_1, L_2, L_{Π} подключаются конденсаторы C_1, C_2, C_3 , которые образуют вместе с ними три параллельных контура (рис. 4.1).

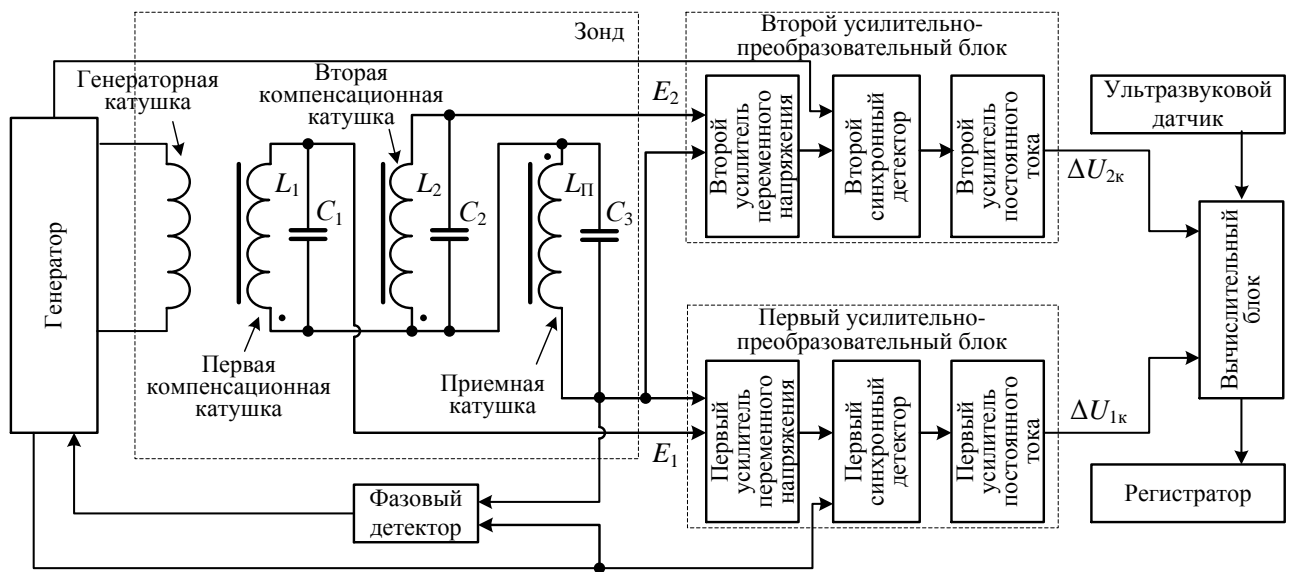


Рисунок 4.1 – Вариант структурной схемы устройства, реализующего метод резонансного индукционного контроля магнитной восприимчивости руды

Для обеспечения эффекта резонанса частота в этих контурах устанавливается равной частоте электромагнитного поля генераторной катушки [44, 45].

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1} = 1/2\pi\sqrt{L_2C_2} = 1/2\pi\sqrt{L_{\Pi}C_3}, \quad (4.1)$$

где L_1 – индуктивность первой компенсационной катушки;

L_2 – индуктивность второй компенсационной катушки;

C_1 – емкость первого конденсатора; C_2 – емкость второго конденсатора;

$L_{\text{П}}$ – индуктивность приемной катушки; C_3 – емкость третьего конденсатора.

Для обеспечения минимальной требуемой глубины проникновения магнитного поля в магнетитовую руду $H_3 = 0,208 / \sqrt{f_p \sigma \cdot 10^{-7}}$ и с учетом проводимости магнетита ($\sigma_M \approx 1500 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$) [65] была выбрана частота резонанса $f_p = 1140$ Гц.

Сопротивление приведенных на структурной схеме (рис. 4.1) приемного и двух компенсационных колебательных контуров на частоте резонанса значительно превышает индуктивное сопротивление приемной катушки [44, 45].

Такое сравнительно простое решение позволяет в 8 раз повысить амплитуду сигнала на приемной катушке и, соответственно, уменьшить относительную погрешность измерения за счет ослабления влияния электромагнитных наводок и помех на результаты преобразования.

Предложенное устройство, реализующее метод резонансного индукционного контроля магнитной восприимчивости руды, 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 установлена в зонде на фиксированном расстоянии $l_{\text{П}}$ от генераторной катушки. Первая компенсационная катушка размещается на расстоянии $0,2l_{\text{П}}$, а вторая компенсационная катушка – на расстоянии $0,8l_{\text{П}}$ от генераторной катушки. При отсутствии магнитной среды (в воздухе) электромагнитное поле индуцирует на двух встречно включенных компенсационных катушках одинаковые по амплитуде и противоположные по фазе ЭДС E_1 и E_2 (рис. 4.1).

Равенство E_1 и E_2 обеспечивается за счет изменения количества витков в компенсационных катушках. В частности, для выбранного варианта геометри-

ческого размещения катушек в зонде вторая компенсационная катушка должна иметь в $0,8l_{\text{ГП}}/0,2l_{\text{ГП}} = 4$ раза больше витков, чем первая [44–46].

При размещении зонда над исследуемой средой происходит ее намагничивание переменным электромагнитным полем генераторной катушки. Появляющийся при этом магнитный поток индуцирует в приемной и в компенсационных катушках ЭДС разной амплитуды. В результате этого на входе первого усилителя появляется ЭДС ΔE_1 , соответствующая разности 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 формируются постоянные или медленно меняющиеся сигналы, которые усиливаются усилителями постоянного тока и поступают на два входа вычислительного блока на основе микроконтроллера. В состав этого микроконтроллера входят коммутатор входных сигналов и аналого-цифровой преобразователь, служащий для получения и обработки в цифровой форме результатов контроля. На третий вход вычислительного блока поступают импульсы от ультразвукового датчика, определяющего величину зазора h между зондом и исследуемой средой для коррекции результатов измерения, которые выводятся на регистратор. По величине фиксируемого в цифровой форме результата контроля 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 $\chi = J/H$, прямо пропорциональной ее намагниченности J и обратно пропорциональной напряженности H магнитного поля.

Значения геометрических факторов зонда G_1 , G_2 зависят от расположения компенсационных катушек относительно генераторной катушки и могут изменяться в широком диапазоне в зависимости от отношения величины зазора между зондом и исследуемой средой и длины зонда $h/l_{\text{ГП}}$ (рис. 3.6).

Разностные ЭДС ΔE_1 и ΔE_2 усиливаются и детектируются первым и вторым усилительно-преобразовательными блоками, которые идентичны друг другу и имеют постоянные коэффициенты преобразования K_1 , K_2 , поэтому напряжения на двух входах вычислительного блока составляют

$$\begin{aligned}\Delta U_{1к} &= K_1 E_0 G_1 \chi, \\ \Delta U_{2к} &= K_2 E_0 G_2 \chi,\end{aligned}\tag{4.2}$$

причем для получения одинаковых максимальных значений измеряемых напряжений $\Delta U_{1\max}$ и $\Delta U_{2\max}$ необходимо выполнение условия $K_1 G_{1\max} = K_2 G_{2\max}$.

Выполнение такого равенства при использовании усилительно-преобразовательных блоков с одинаковыми коэффициентами преобразования $K_1 = K_2$ сводится к обеспечению близких максимальных значений геометрических факторов зонда $G_{1\max} = G_{2\max}$. Практически такое условие можно выполнить, в частности, подбором количества витков первой компенсационной катушки по сравнению с числом витков второй компенсационной катушки с учетом их пространственного размещения относительно генераторной катушки.

Использование ультразвукового датчика позволяет обеспечить инвариантность метода резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде к геометрическому фактору. Ультразвуковой датчик определяет величину зазора h между зондом и поверхностью исследуемой среды и подает импульсы разной длительности на третий вход вычислительного блока (рис. 4.1). Микроконтроллер при этом автоматически изменяет коэффициент преобразования сигналов $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$, поступающих от усилителей постоянного тока, выполняет их взаимное сравнение и выделяет наибольший из них, по величине которого вычисляется кажущая магнитная восприимчивость исследуемой среды. Окончательный расчет массовой доли железа W производится с учетом коэффициента пересчета k_{md} . Результат расчета отображается на дисплее регистратора и запоминается в оперативной памяти микроконтроллера для сравнения с допустимым по условиям контроля граничным значением.

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

Для оценки эффективности предложенного технического решения было проведено моделирование устройства на ПЭВМ в программе *Electronics Workbench Pro* [47, 48], в результате которого установлено следующее:

1) при подаче на генераторную катушку синусоидального напряжения с амплитудой $U_{\Gamma} = 10$ В и частотой $f_{\Gamma} = 1140$ 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.

При использовании предложенного метода резонансного контроля в приборах для технологической оценки массовой доли железа в магнетитовой руде на обогатительной фабрике целесообразно для подавления сетевой помехи промышленной частоты 50 ± 1 Гц выполнять интегрирующее аналого-цифровое преобразование напряжения методом весовых функций [55]. В процессе такого преобразования исследуемое напряжение интегрируется в течение трех тактов, имеющих длительности 10 мс, 20 мс и 30 мс с промежутками времени между ними, составляющими 10 мс, после чего измеряется время линейного разряда интегратора до исходного значения. Применение такого способа кодирования напряжения позволяет ослабить влияние сетевой помехи не менее чем на 60 дБ (в 1000 раз) без защитного экранирования аппаратуры контроля [55, 56].

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

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

На основании проведенных исследований для реализации метода резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде разработан алгоритм [48], блок-схема которого представлена на рисунке 4.2.

В соответствии с предложенным алгоритмом контроль массовой доли железа в магнетитовой руде осуществляется в следующей последовательности.

1. Исходными данными для работы алгоритма являются:

- измеренное значение напряжения в воздушной среде U_0 при отсутствии исследуемого образца;

- величина зазора между зондом и поверхностью исследуемой среды h_i ;
- измеренные значения напряжений на выходах первого и второго усилительно-преобразовательных блоков при фиксированной величине зазора между зондом и исследуемой средой $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$.

Исходные данные вводятся в вычислительный блок на шаге 2, 4 и 6 автоматически по командам управляющего микроконтроллера.

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

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

4. Размещение зонда над рудосодержащей массой и измерение величины зазора h_i между зондом и поверхностью исследуемой руды. Максимальная высота размещения зонда выбирается на этапе калибровки устройства, и в данном случае не должна превышать предельного значения, составляющего 100 см.

5. 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.

6. Формирование приращений напряжений $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$ при фиксированной величине зазора между зондом и поверхностью исследуемой среды h_i .

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

8. 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.

9. 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 $\Delta N = k_i \cdot N_{\max}$.

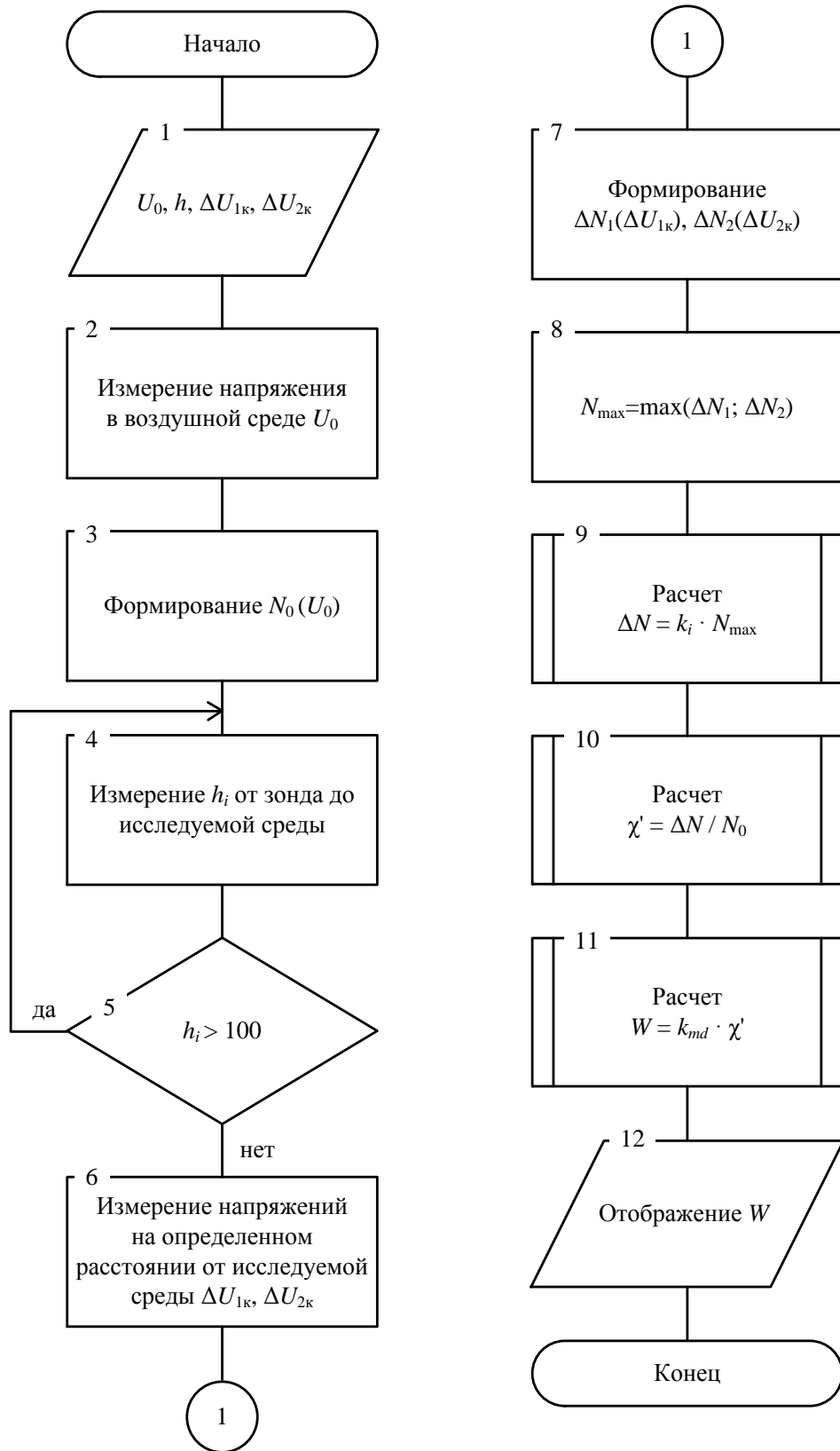


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантного к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля

Корректировка значения ΔN производится за счет изменения масштабирующего коэффициента k_i , который формируется в соответствии с блок-схемой алгоритма калибровки устройства контроля массовой доли железа в магнетитовой руде (рис. 4.3), и будет описан ниже.

10. Расчет кажущейся магнитной восприимчивости исследуемой магнетитовой среды $\chi' = \Delta N / N_0$.

11. Расчет массовой доли железа $W = k_{md}\chi'$ с учетом коэффициента пересчета k_{md} .

12. Отображение рассчитанного значения массовой доли железа W на дисплее регистратора и 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 руды для учета геометрического фактора.

Для расчета и нормирования масштабирующих коэффициентов разработан алгоритм калибровки устройства контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, блок-схема которого представлена на рисунке 4.3.

В соответствии с данным алгоритмом контроль массовой доли железа в магнетитовой руде выполняется в следующей последовательности.

1. Исходными данными для работы алгоритма являются:

- величина зазора между измерительным зондом и эталоном среды h_i ;
- измеренные напряжения на выходе первого и второго усилительно-преобразовательных блоков на фиксированном расстоянии от зонда до эталона среды $\Delta U_{1к}$ и $\Delta U_{2к}$.

Размер эталона среды должен быть больше геометрических размеров зонда. В качестве эталона среды может быть использован металлический лист или пластина с размерами, например, $1,2 \times 1,2 \times 0,03$ м.

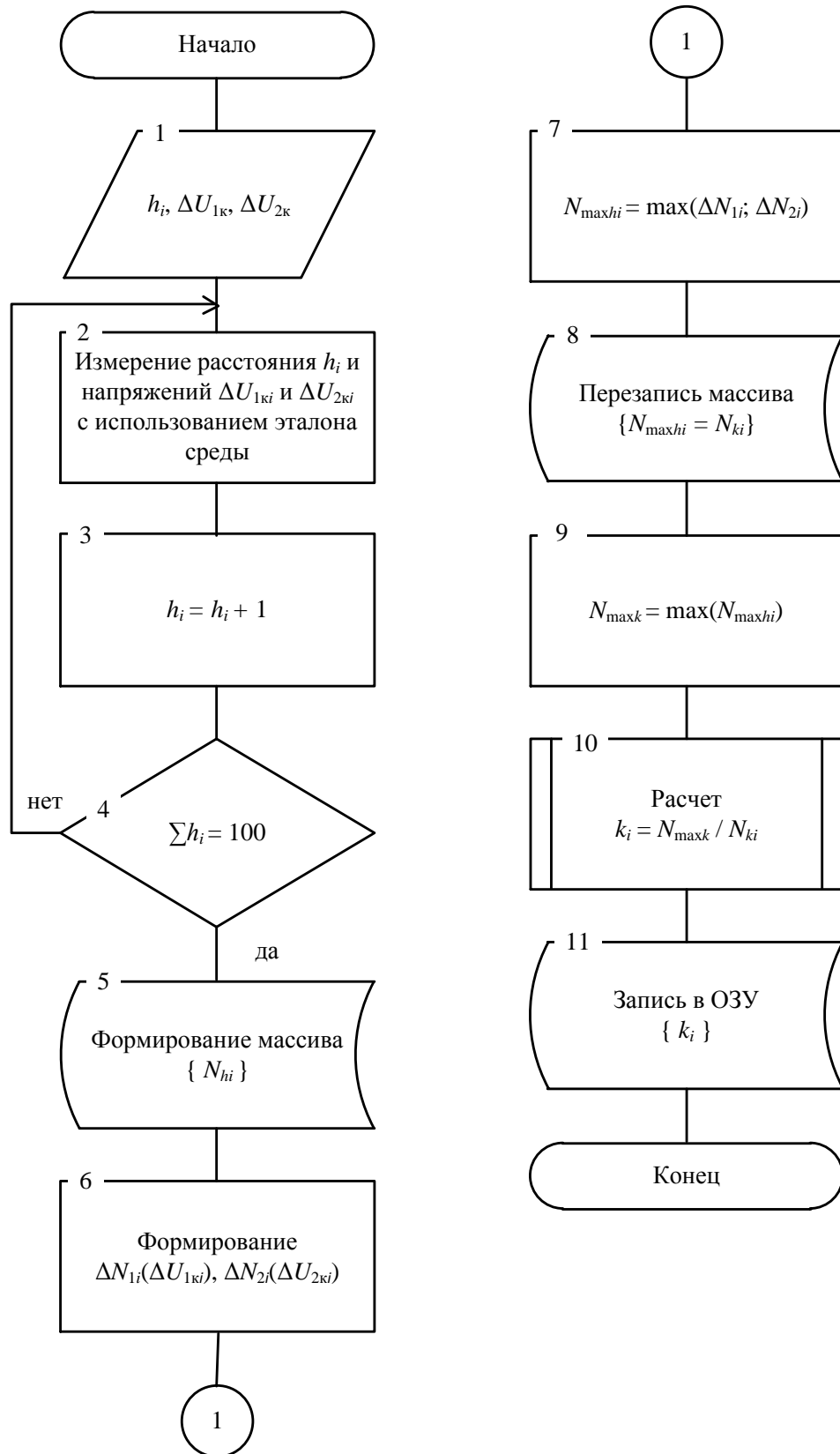


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма калибровки устройства контроля массовой доли железа в магнетитовой руде

Исходные данные вводятся в память микроконтроллера вычислительного блока на шаге 2 и 6 автоматически.

2. Измерительный зонд размещается горизонтально над эталоном среды и выполняется измерение величины зазора h_i между зондом и поверхностью среды, а также измеряются значения напряжений ΔU_{1ki} и ΔU_{2ki} , получаемых на выходах усилительно-преобразовательных блоков. При этом первое измерение должно выполняться при размещении измерительного зонда вплотную с эталоном среды (т.е. зонд должен контактировать с эталоном среды), а второе измерение – на известном расстоянии h_i между зондом и средой.

3. Выполняется подъем зонда на максимальную высоту над эталоном контролируемой среды. В процессе его подъема дискретно через 1 см выполняется измерение величины зазора h_i между зондом и листом ультразвуковым датчиком. Максимальная высота подъема измерительного зонда выбирается исходя из минимального значения напряжения на приемной катушке и возможности практического использования устройства, и в данном алгоритме выбирается $h_{i\max} = 100$ см.

4. Подсчет количества измерений величины h_i выполняется до тех пор, пока не выполнится условие $\sum h_i = 100$.

5. Формирование в цифровой форме массива значений ширины каждого импульса, поступающего с выхода ультразвукового датчика $\{N_{hi}\}$. Полученные значения $\{N_{hi}\}$ необходимы для использования в качестве адресов ячеек оперативного запоминающего устройства микроконтроллера, соответствующих определенной высоте подъема зонда над исследуемой средой.

6. Выполнение аналого-цифрового преобразования измеренных на шаге 2 приращения напряжений ΔU_{1ki} и ΔU_{2ki} и формирование соответствующих им цифровых кодов $\Delta N_{1i}(\Delta U_{1ki})$ и $\Delta N_{2i}(\Delta U_{2ki})$.

7. В связи с тем, что в дальнейших расчетах необходимо использовать только одно значение напряжения на каждом i -шаге, то осуществляется выбор максимального значения кода $N_{\max hi} = \max(\Delta N_{1i}, \Delta N_{2i})$.

8. Выполнение перезаписи массива полученных значений $\{N_{maxhi}\}$ под другим именем $\{N_{ki}\}$. Данная процедура необходима для обеспечения расчета масштабирующих коэффициентов относительно одного максимального (из всех возможных $\{N_{maxhi}\}$) значения кода (шаг 9), принятого за образцовую величину.

9. Выбор одного максимального значения кода $N_{maxk} = \max(N_{maxhi})$, соответствующего разностному значению напряжения на приемной и компенсационных катушках, полученному на оптимальной высоте подъема зонда над эталоном среды.

10. Расчет масштабирующих коэффициентов для каждого значения высоты ($h_i = 0 \div 100$ см) относительно максимального значения кода $k_i = N_{maxk} / N_{ki}$.

11. Запись рассчитанных значений масштабирующих коэффициентов k_i в оперативное запоминающее устройство в соответствующие адреса N_{hi} , определяемые длительностью выходных импульсов ультразвукового датчика.

При выполнении операций в соответствии с алгоритмами (рис. 4.2, 4.3) микроконтроллер вычислительного блока при расчете кажущейся магнитной восприимчивости руды за счет масштабирующих коэффициентов k_i будет автоматически учитывать влияние геометрических размеров зонда и неровностей исследуемого образца. Вследствие этого субъективная погрешность, связанная с выбором конкретных значений поправочных коэффициентов из руководства по эксплуатации средства контроля, будет сведена к нулю.

Кроме этого, при реализации данных алгоритмов и записи полученных коэффициентов в постоянное запоминающее устройство микроконтроллера вычислительного блока практически исключается методическая погрешность, связанная с необходимостью точного размещения зонда над исследуемой средой на определенном (или оптимальном) расстоянии. В итоге значительно упрощается процесс применения устройства, реализующего предложенный метод резонансного контроля качества рудной массы, а также появляется реальная возможность учета и регулировки параметров технологического процесса обогащения руды в производственных условиях.

Использование рассмотренных алгоритмов позволяет реализовать калибровку и линеаризовать характеристику преобразования устройства контроля на эталонном образце, однако при контроле качества руды с разным минералогическим составом необходимо вводить соответствующие коэффициенты пересчета, т. е. выполнить конкретную настройку прибора следующим образом.

1. Установить измерительный зонд на среднем расстоянии до поверхности контролируемой рудной массы и измерить исходное значение кажущейся магнитной восприимчивости χ' .

2. Определить массовую долю железа W_{lab} контролируемой рудной массы весовым (гравиметрическим) методом в лабораторных условиях.

3. Вычислить коэффициент пересчета для данной рудной массы по отношению этих величин: $k_{md} = W_{lab}/\chi'$.

4. Ввести коэффициент пересчета k_{md} в постоянное запоминающее устройство микроконтроллера вычислительного блока для автоматического умножения на него дальнейших показаний устройства.

При реализации данного устройства на современной элементной базе можно использовать для измерения величины зазора между зондом и поверхностью руды ультразвуковой датчик типа *HC-SR04* с диапазоном измерения 2 – 400 см и разрешением 0,3 см при напряжении питания 5 В [49], а в качестве вычислительного блока – микроконтроллер типа *TMP90C840P* [50].

4.3 Применение средств резонансного индукционного контроля в технологической схеме добычи, переработки и обогащения железной руды

Средства резонансного индукционного контроля можно использовать на различных этапах добычи, технологической переработки и обогащения железной руды (рис. 4.4):

- при оперативном опробовании стенок горных выработок, а также оценки качества рудной массы в навалах и на самосвалах;
- при автоматическом управлении процессом сепарации;
- при оценке качества готового концентрата.

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 мокрой магнитной сепарации руды, и кондиционная руда не вывозится в отвал.

При этом средства резонансного индукционного контроля применяются в составе рудоконтролирующих станций (РКС) непосредственно на рудниках и карьерах по добыче железной руды и позволяют обеспечивать:

- 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;

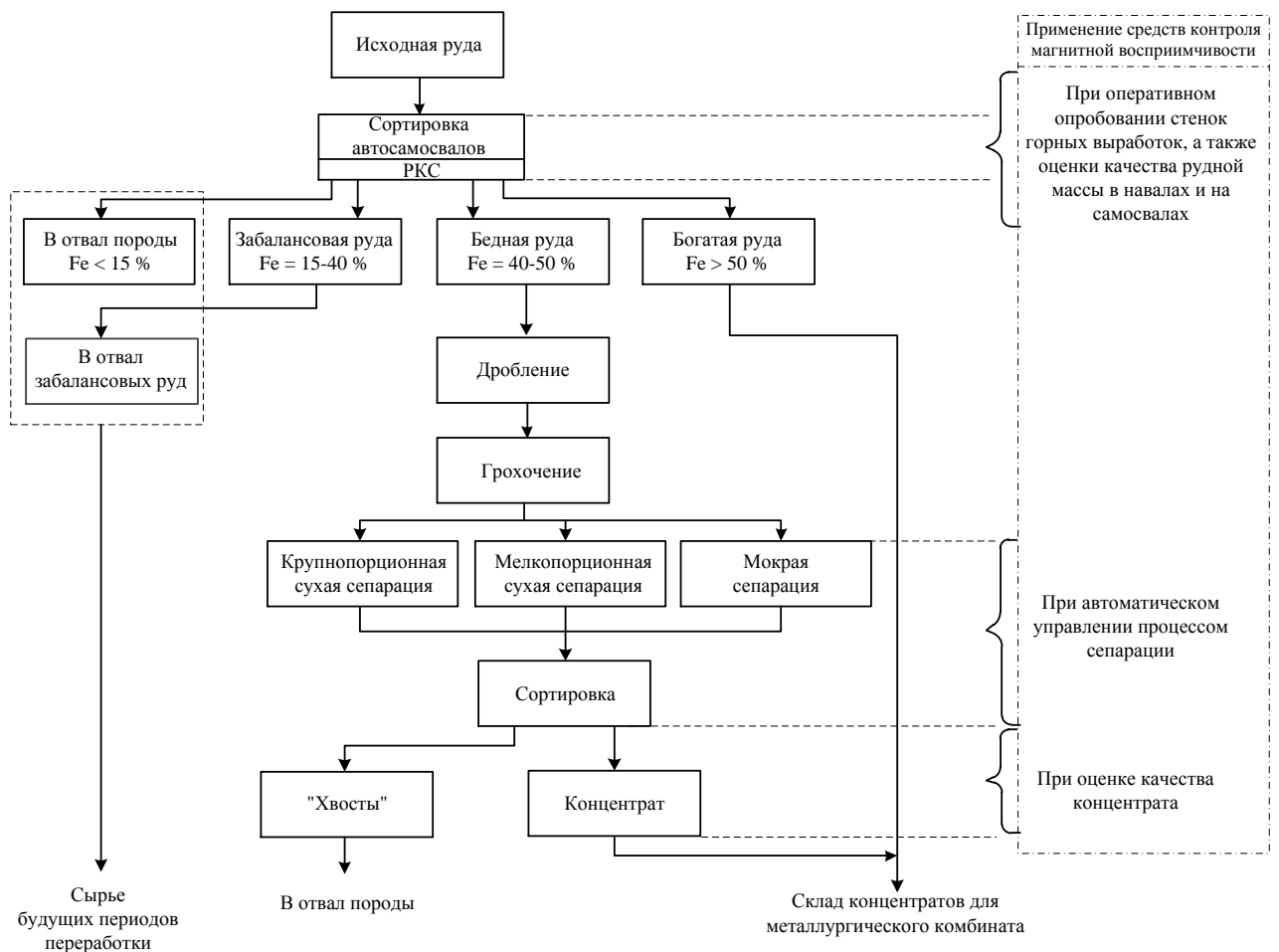


Рисунок 4.4 – Варианты применения средств резонансного индукционного контроля в технологической схеме добычи, переработки и обогащения железной руды

– 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.

Основными показателями качества сырья для металлургических предприятий черной металлургии является значение и дисперсия массовой доли железа в железорудном концентрате [16].

Стабильность массовой доли железа в концентрате существенно влияет не только на технико-экономические показатели работы доменных печей, но и на экспортную цену железорудного концентрата.

В соответствии с технологической картой процесса обогащения на выходе каждого технологического комплекса обогащения необходимо поддерживать определенную массовую долю железа. Эту задачу невозможно решить без автоматического контроля и регулирования массовой доли железа на выходе каждого комплекса обогащения.

Поэтому повышение точности автоматического контроля и регулирования массовой доли железа в продуктах обогащения железных магнетитовых руд является актуальной задачей.

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 [16, 19].

Расчет массовых долей железа в исходной руде $A^{(j)}$, концентрате $B^{(j)}$ и "хвостах" $N^{(j)}$ магнитного j -го сепаратора производится по уравнениям регрессии [16]

$$A^{(j)} = a_{0j} + a_{1j} \overline{BR}^{(j)}, \quad (4.3)$$

$$B^{(j)} = b_{0j} + b_{1j} \overline{BK}^{(j)}, \quad (4.4)$$

$$N^{(j)} = n_{0j} + n_{1j} \overline{BX}^{(j)}, \quad (4.5)$$

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

Таким образом, предложенный метод резонансного индукционного контроля качества руды с автоматической компенсацией погрешности от изменения величины зазора между измерительным зондом и поверхностью рудной массы позволяет реализовать непрерывный технологический контроль на всех этапах добычи и обогащения руды, что характеризует универсальность его применения.

4.4 Выводы по четвертой главе

1. На основании предложенного метода разработана структура модернизированного прибора резонансного индукционного контроля массовой доли железа в рудной массе с автоматической компенсацией погрешности от изменения величины зазора между измерительным зондом и поверхностью руды. Применение для этой цели ультразвукового датчика позволяет расширить диапазон размещения измерительного зонда над исследуемой средой от 2 до 100 см, который примерно на порядок превышает диапазон измерения существующих средств, применяемых для контроля качества рудной массы.

2. При разработке приборов контроля качества магнетитовых руд генераторную и измерительную катушки в конструкции зонда нужно размещать параллельно друг другу и перпендикулярно к поверхности исследуемого материала, что позволяет примерно в 1,5 раза повысить чувствительность прибора контроля к содержанию металла в рудной массе. Применение сердечника в генераторной катушке нецелесообразно, так как напряженность электромагнитного поля зависит только от числа витков w и тока намагничивания $I_{Г}$, и при постоянной амплитуде напряжения генератора ток намагничивания уменьшается при увеличении индуктивного сопротивления обмотки в случае применения ферромагнитного сердечника.

3. В соответствии с предложенной структурой модернизированного прибора резонансного индукционного контроля массовой доли железа в рудной массе разработан алгоритм резонансного индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантный к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля, позволяющий повысить достоверность результатов резонансного контроля массовой доли железа в рудной массе за счет применения микропроцессорной обработки данных и формирования интегральной оценки, характеризующей количественный состав железа в руде.

4. Предложенный метод резонансного индукционного контроля качества магнетитовой руды позволяет реализовать непрерывный технологический контроль на всех этапах добычи и обогащения руды, что характеризует универсальность его применения.

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 катушками. 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 разработанного 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожев, Х.Х. Способы управления качеством руд при подземной добыче [Текст] / Х.Х. Кожев, Г.Н. Хугаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. – №4. – С. 210–214.
2. Бакланова, К.А. Методы ускоренного анализа железных, никелевых марганцевых руд / К.А. Бакланова. – М.: Госгеолиздат, 1951. – 233 с.
3. Основы аналитической химии. В 2 кн. Кн. 2. Методы химического анализа: Учеб. для вузов / [Ю.А. Золотов и др.]. Под редакцией академика Ю.А. Золотова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 494 с.
4. Аналитическая химия. Проблемы и подходы. В 2-х т. Р. Кельнер, Ж. М. Мерме, М. Отто, Г. М. Видмер. Перевод под редакцией академика Ю. А. Золотова. – М.: Мир, 2004. Т.1. – 600с.
5. Харитонов, Ю.Я. Аналитическая химия. Аналитика. В 2-х кн. / Ю.Я. Харитонов – М.: Высшая школа, 2001. Кн.1. – 615 с.
6. Анализ минерального сырья. Под общей редакцией Ю.Н. Книповича, Ю.В. Морачевского. – 3-е изд., стереотипное, исправленное. – Л.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1959. – 1047 с.
7. Унифицированные методы химического анализа железных и марганцевых руд [Текст] : Проект / Акад. наук Союза ССР. Ин-т металлургии. Нар. ком. черной металлургии. Техн. отд. – Свердловск, 1943. – 143 с.
8. Основы аналитической химии. Практическое руководство. Под редакцией академика Ю.А. Золотова. – М.: Высшая школа, 2001. – 463 с.
9. Васильев, В.П. Аналитическая химия. В 2-х ч. / В.П. Васильев – М.: Высшая школа, 1989. Ч.1. – 320 с.
10. Алексеев, В.Н. Количественный анализ / В.Н. Алексеев. – М.: Химия, 1972. – 504 с.
11. Кудрявцев, Ю.И. Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород и руд в естественных условиях / Ю.И. Кудрявцев. – Л.: Недра, 1978. – 240 с.

12. Кудрявцев, Ю.И. Индукционные методы измерения магнитной восприимчивости горных пород в естественном залегании и на образцах / Ю.И. Кудрявцев. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2009. – 211 с.
13. Кудрявцев, Ю.И., Сараев А.К. Каротаж магнитной восприимчивости / Ю.И. Кудрявцев, А.К. Сараев. – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. – 269 с.
14. Альбов, М.Н. Опробование месторождений полезных ископаемых / М.Н. Альбов. – М.: Недра, 1975. – 352 с.
15. Альбов, М.Н. Рудничная геология / М.Н. Альбов, А.М. Быбочкин. – М.: Недра, 1973. – 430 с.
16. Кочура, Е.В. Система автоматического контроля и регулирования качества концентрата на выходе секции обогащения магнетитовых руд / Е.В. Кочура, Ислам Абдельхамид Юсеф Аль Бостанжи // Обогащение полезных ископаемых: Науч.-техн. сб. – 2005. – Вып. 24 (65). – С. 100–105.
17. Способ автоматического контроля содержания магнитных фракций в продуктах обогащения магнитного сепаратора : пат. А.С. 1375341 (СССР) / Кочура Е.В. – Оpubл. 23.02.88. Бюл. №7, 1988.
18. Способ автоматического контроля процесса магнитной сепарации : пат. А.С. 1708423 (СССР) / Кочура Е.В. – Оpubл. 11.04.89. Бюл. №4, 1989.
19. Кочура, Е.В. Метод автоматического контроля массовой доли железа в концентрате магнитного сепаратора / Е.В. Кочура, Ислам Абдельхамид Юсеф Аль Бостанжи // Науковий вісник НГУ. – 2005. – №10. – С. 86–89.
20. Руководство по эксплуатации ТУ 1.530.054. Рудничный измеритель магнитной восприимчивости РИМВ-3 // ФГУНПП "Геологоразведка". 1992. – 8 с.
21. Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / Под ред. Е.П. Лемана, А.П. Савицкого. СПб.: ВИРГ – Рудгеофизика, 2000. – 414 с.
22. Руководство по эксплуатации ТТ 2.899.000 РЭ. Измеритель магнитной восприимчивости полевой ПИМВ-М // Министерство природных ресурсов РФ. ФГУНПП "Геологоразведка". 2007. – 19 с.

23. 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.

24. MS2/MS3 Magnetic Susceptibility System [Электронный ресурс] / Innovation in Magnetic Measuring Instruments. – Режим доступа: www.bartington.com. – Загл. с экрана.

25. Нагата, Т. Магнетизм горных пород / Т. Нагата. – М.: Мир, 1965. – 348 с.

26. Логачев, А.А. Магниторазведка / А.А. Логачев, В.П. Захаров. – Изд. 4-е. – Л.: "Недра", 1973. – 352 с.

27. Ренард, Н.В. Некоторые результаты лабораторного изучения частотной дисперсии магнитных свойств горных пород и руд / Н.В. Ренард, В.Г. Семенов // Изв. вузов. Геология и разведка, 1972. – №5. – С. 108–110.

28. Кудрявцев, Ю.И. Расчет вертикальных индукционных установок для измерений магнитной восприимчивости на плоской поверхности / Ю.И. Кудрявцев // Вопросы геофизики, 1970. – №20. – С. 112–120.

29. Инструкция по проведению геофизических исследований рудных скважин / Под ред. Е.П. Лемана, А.П. Савицкого. СПб.: ВИРГ – Рудгеофизика, 2000. – 414 с.

30. Кудрявцев, Ю.И. Способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки в аппаратуре каротажа магнитной восприимчивости / Ю.И. Кудрявцев, В.А. Мейер // Вопросы геофизики, 1969. – №19. – С. 70–73.

31. Кудрявцев, Ю.И. Стабилизация магнитного момента генераторной катушки при изменении ее импеданса под влиянием внешней среды / Ю.И. Кудрявцев // Вопросы геофизики, 1974. – №24. – С. 110–127.

32. Способ стабилизации магнитного момента генераторной катушки с ферромагнитным сердечником : пат. А.С. 506821 / Кудрявцев Ю.И. – Оpubл. 11.11.76. Бюл. №10, 1976.

33. Афанасьев, Ю.В. Феррозонды / Ю.В. Афанасьев – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.

34. Яновский, Б.М. Земной магнетизм. В 2-х томах / Б.М. Яновский – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1963. Т.2. – 462 с.
35. Мизюк, Л.Я. Элементы транзисторных схем измерительной аппаратуры для индуктивной электроразведки / Л.Я. Мизюк – Киев: Наукова думка, 1970. – 280 с.
36. Кудрявцев, Ю.И. Влияние магнитного момента приемной катушки на результаты измерений с двухкатушечным зондом / Ю.И. Кудрявцев // Геофизическая аппаратура, 1969. – №41. – С. 123–126.
37. Тихонов, Б.Н. Применение двухкатушечного зонда для измерения магнитной восприимчивости с целью опробования стенок горных выработок / Б.Н. Тихонов, Г.С. Дозмарова, О.А. Квачевский // Методы разведывательной геофизики, 1973. – №17. – С. 105–109.
38. Кудрявцев, Ю.И. Анализ геометрии двухкатушечных установок для измерений магнитной восприимчивости на плоской поверхности / Ю.И. Кудрявцев // Вопросы геофизики, 1972. – №22. – С. 106–116.
39. Запорожец, В.М. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика / В.М. Запорожец. – М.: Недра, 1983. – 591 с.
40. Микушин, А.В. Цифровые устройства и микропроцессоры / А.В. Микушин, А.М. Саженов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 832 с.
41. Устройство контроля магнитной восприимчивости : пат. 2006888 Рос. Федерация : МПК G 01 R 33/16 / Кудрявцев Ю.И., Микляев Ю.В. ; заявитель и правообладатель Кудрявцев Ю.И., Микляев Ю.В. ; заявл. 28.04.1992 ; опубл. 30.01.1994, Бюл. №4. – 14 с.
42. Устройство контроля магнитной восприимчивости среды: пат. 163337 Рос. Федерация : МПК G 01 R 33/16 / 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. – 8 с.
43. 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.

44. Изюмов, Н.М. Основы радиотехники / Н.М. Изюмов, Д.П. Линде. – 4-е издание. – М.: Радио и связь, 1983. – 376 с.
45. Основы теории цепей: Учебник для вузов / В.П. Попов. – М.: Высш. шк., 1998. – 575 с.
46. Электричество: Учебное пособие / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
47. Применение программы схемотехнического моделирования Electronics Workbench: Учебное пособие / Г.П. Корнилов, Ю.А. Кирпичников. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 26 с.
48. Баженов, И.Н. Алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде [Текст] / И.Н. Баженов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2017. – Т. 17. №3. – С. 400–408. doi: 10.17586/2226-1494-2017-14-3-400-408.
49. Каталог продукции Arduino. Технические характеристики HC-SR04 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://arduino-diy.com/arduino-ultrazvukovoy-datchik-rasstoyaniya>, свободный. Яз. рус. – Загл. с экрана.
50. Справочник по микроконтроллерам. Технические характеристики микроконтроллера типа TMP90C840P [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.datashit26.com/PDF/538365/TMP90C840P-pdf.html>, свободный. Яз. англ. – Загл. с экрана.
51. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей: Справочное пособие / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 488 с.
52. Цейтлин, Л.А. Индуктивности проводов и контуров / Л.А. Цейтлин. – Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 227 с.
53. Тихонов, Б.Н. Основы метрологии и электротехнические измерения / Б.Н. Тихонов. – Орел: ВИПС, 1999. – 490 с.
54. Теоретическая физика: Учебное пособие для вузов. В 10 т. Том III. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 4-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 768 с.

55. Гутников, В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1990. – 192 с.

56. Гутников, В.С. Методы реализации специальных весовых функций в измерительных устройствах / В.С. Гутников // Измерения, контроль, автоматизация, 1983. №2. С. 3–15.

57. 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.

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

59. 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-Западный государственный университет, 2013. – С. 67–70.

60. 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.); Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО "Университетская книга", Курск, 2016. – С. 11-14.

61. Устройство двухпараметрового контроля толщины электропроводных покрытий: пат. 2533756 Рос. Федерация : МПК G 01 N 27/90 / 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.

62. 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.: Го-

рохов А.А. (отв. ред.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО "Университетская книга", 2017. – С. 29–33.

63. 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 апреля 2017 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.). – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО "Университетская книга", 2017. – С. 26–29.

64. 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.

65. Техника высоких напряжений: Учеб. для вузов / [Д.В. Разевич и др.]. Под общей ред. Д.В. Разевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 368 с.

66. 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 %).

67. ГОСТ 23581.18–81. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Метод определения железа (общего). – М.: Государственный стандарт СССР, 1981. – 11 с.

68. ГОСТ 26136–84. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для физических испытаний. – М.: Государственный стандарт СССР, 1984. – 8 с.

69. ГОСТ Р 52939-2008. Руды железные товарные необогащенные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.

70. ГОСТ Р ИСО 5725–1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – М.: Стандартиформ, 2002. – 11 с.

71. ГОСТ Р ИСО 5725–6–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. – М.: Стандартиформ, 2002. – 10 с.

72. ГОСТ Р 52361–2005. Контроль объекта аналитический. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2005. – 8 с.

73. ГОСТ 8.315–97. Государственная система обеспечения единства измерений. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 1997. – 8 с.

74. НДП 01.05.635–2007. Руды железные (титаномагнетитовые, скарномагнетитовые, в том числе сульфидосодержащие) и продукты их переработки. Определение массовой доли железа магнетита. Магнитно-химический метод. – Екатеринбург: ИСО, 2007. – 8 с.

75. НДП 03.06.192–2009. Руды железные и продукты их обогащения. Определение массовой доли железа магнетита. Магнитометрический метод. – Екатеринбург: ИСО, 2009. – 10 с.

76. Математические методы в геологии: Учебник для вузов / А.Б. Каждан, О.И. Гуськов. – М.: Недра, 1990. – 186 с.

77. Новожилов, М.Г. Качество рудного сырья черной металлургии / М.Г. Новожилов, Я.Ш. Ройзен, А.М. Эрперт. – М.: Недра, 1977. – 415 с.

78. Каллистов, П.Л. Методы экспериментального определения рациональных схем обработки проб / П.Л. Каллистов // Сов. геология, 1938. Т. 8. – №10. – С. 82–98.

79. Каллистов, П.Л. К вопросу обработки проб / П.Л. Каллистов // Заводская лаборатория, 1949. Т. XV. – №8. – С. 977–988.

80. Карпенко, Н.В. Опробование и контроль качества продуктов обогащения руд / Н.В. Карпенко. – М.: Недра, 1987. – 258 с.

81. Козин, В.З. Опробование на обогатительных фабриках / В.З. Козин. – М.: Недра, 1988. – 287 с.

82. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов: Учебник для вузов / В.З. Козин, О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1990. – 343 с.
83. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. Учебник для вузов / В.З. Козин. – М.: Недра, 1985. – 294 с.
84. Теория опробования: Учебное пособие / В.З. Козин, Т.В. Нестерова. – Свердловск, изд. СГИ им. В.В. Вахрушева, 1990. – 88 с.
85. Козин, В.З. Экспериментальное моделирование и оптимизация процессов обогащения полезных ископаемых / В.З. Козин. – М.: Недра, 1984. – 113 с.
86. Козин, В.З. Минимальная масса пробы при опробовании однородного массива / В.З. Козин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1980. – №11. – С. 94–100.
87. Козин, В.З. Минимальная масса пробы и количество частичных проб при опробовании неоднородного массива / В.З. Козин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – №2. – С. 89–93.
88. Козин, В.З. Погрешность опробования пробы / В.З. Козин, Л.А. Карпов, Е.Ф. Цыпин, Н.М. Тююшева // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – №9. – С. 127–129.
89. Козин, В.З. Погрешность обработки пробы / В.З. Козин, Л.А. Карпов, Е.Ф. Цыпин, Н.М. Тююшева // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – №5. – С. 117–119.
90. Козин, В.З. Погрешность результатов опробования / В.З. Козин, Л.А. Карпов, Е.Ф. Цыпин, Н.М. Тююшева // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – №11. – С. 124–126.
91. Козин, В.З. Особенности опробования при определении малых концентраций загрязняющих окружающую среду компонентов // системный анализ и управление в задачах рационального природопользования и охраны окружающей среды / В.З. Козин, Т.В. Нестерова // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – Ереван, 1988. – С. 51–52.
92. Козин, В.З. Об анализе товарного баланса на обогатительных фабриках / В.З. Козин, Т.В. Нестерова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. – №7. – С. 137–139.

93. Козин В.З. Влияние уровня допустимых расхождений и правил отбраковки на результаты анализа зернистых продуктов / В.З. Козин, Т.В. Нестерова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1992. – №9. – С. 158–162.

94. Козин, В.З. Формулы раскрытия фаз и образования сростков при разрушении кусков руды / В.З. Козин, Т.В. Нестерова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1995. – №9. – С. 131–136.

95. Козин, В.З. Аналитический расчёт и использование вероятной систематической погрешности результатов опробования руд и концентратов / В.З. Козин, Т.В. Нестерова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1997. – №1–2. – С. 146–149.

96. Локонов, М.Ф. Опробование на обогатительных фабриках / М.Ф. Локонов. – М: Госгортехиздат, 1961. – 276 с.

97. Серго, Е.Е. Опробование и контроль технологических процессов обогащения / Е.Е. Серго. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979. – 271 с.

98. Хан, Г.А. Опробование и контроль технологических процессов обогащения / Г.А. Хан. – М.: Недра, 1979. – 302 с.

99. Чечотт, Г.О. Опробование и испытание полезных ископаемых / Г.О. Чечотт. – М.: Государственное научно-техническое горно-геологическое издательство, 1932. – 144 с.

100. Козин, В.З. Связь вероятной систематической погрешности опробования со случайной / В.З. Козин, Т.В. Нестерова, Г.Л. Тюрина // Изв. вузов. Горный журнал. – 2000. – № . – С. 105–106.

101. Козин, В.З. Общая схема обогащения полезных ископаемых / В.З. Козин // Изв. вузов. Горный журнал. – 2001. – № 4–5. – С. 8–16.

102. Козин, В.З. Разработка оборудования для отбора и сокращения проб / В.З. Козин, Ю.П. Морозов, Г.Л. Тюрина // Материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках Международной выставки "Уралэкология. Техноген-2002". – С. 164–168.

103. Новые теоретические решения и развитие технологии и техники обогащения полезных ископаемых / В.З. Козин [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. – №3. – 2002. – С. 116–131.

104. Козин, В.З. Опробование и автоматизация обогатительных фабрик / В.З. Козин, Т.В. Нестерова, Г.Л. Тюрина // Изв. вузов. Горный журнал. – №2. – 2002. – С. 54–57.

105. Тюрина, Г.Л. Получение количественной характеристики вероятной систематической погрешности опробования путём имитационного моделирования / Г.Л. Тюрина // Изв. вузов. Горный журнал. – 2001. №4–5 – С. 76–81.

106. Мададха, Убай Юсеф Саламах Аль. Автоматический контроль массовой доли железа в хвостах магнитного сепаратора / Убай Юсеф Саламах Аль Мададха // Науковий вісник НГУ, 2009. – №1. – С. 66–68.

107. Бурков, Ф.А. Геофизические исследования скважин / Ф.А. Бурков, В.И. Исаев. – Томск: ТПУ, 2013. – 86 с.

108. Кожиев, Х.Х., Рудничные системы управления качеством минерального сырья / Х.Х. Кожиев, Г.Г. Ломоносов. – М.: МГГУ, 2005. – 292 с.

109. Ломоносов, Г.Г. Повышение качества продукции отечественного горнорудного производства как основа повышения ее конкурентоспособности / Г.Г. Ломоносов // Горный журнал, 2004. – №10. – С. 74–78.

110. Миронцов, Н.Л. О методе импульсного индукционного каротажа / Н.Л. Миронцов // Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, 2010. – №7. – С. 110–112.

111. Шолпо, Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач / Л.Е. Шолпо. – Л.: Недра, 1977. – 182 с.

112. Яковлев, А.А. Аномальное поле включений в модели двухслойной среды при возбуждении сторонним потенциальным полем / А.А. Яковлев // Материалы Международной научно-практической конференции "Вопросы метода искусственного подмагничивания". 1991. – С. 77–84.

113. Аузин, А.А. Повышение точности опробования магнетитовых руд в их естественном залегании / А.А. Аузин // Вестник ВГУ. Серия: Геология, 2014. – №1. – С. 91–94.

114. Аузин, А.А. Скважинный индукционный пластовый наклономер для исследования железорудных месторождений / А.А. Аузин // Геофизическая аппаратура, 1984. – №79. – С. 95–98.

115. Приборы для неразрушающего контроля и изделий. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1976. – 326 с.
116. Зарайский, В.Н. Усреднение руд / В.Н. Зарайский, К.П. Николаев, К.В. Казанский. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
117. Бызов, В.Ф. Управление качеством продукции карьеров / В.Ф. Бызов. – М.: Недра, 1991. – 239 с.
118. Кармазин, В.В. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: МГГУ, 2005. – 669 с.
119. Хмелевской, В.К. Геофизические методы исследования земной коры / В.К. Хмелевской. – Дубна: Международный университет природы, общества и человека "Дубна", 1997. – 280 с.
120. Геофизические методы исследования / Под. ред. В.К. Хмелевского. – М.: Недра, 1988. – 288 с.
121. Горбачев, Ю.И. Геофизические исследования скважин / Ю.И. Горбачев. – М.: Недра, 1990. – 302 с.

Патент на изобретение № 2533756

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2533756

**УСТРОЙСТВО ДВУХПАРАМЕТРОВОГО КОНТРОЛЯ
ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Патентообладатель(ли): *Государственное казенное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования Академия Федеральной службы охраны
Российской Федерации (Академия ФСО России) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013123328

Приоритет изобретения 21 мая 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 23 сентября 2014 г.

Срок действия патента истекает 21 мая 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Патент на полезную модель № 163337

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 163337

**УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ МАГНИТНОЙ
ВОСПРИИМЧИВОСТИ СРЕДЫ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Приокский государственный университет" (ФГБОУ ВО "ПГУ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

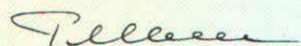
Заявка № 2015149581

Приоритет полезной модели 18 ноября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 24 июня 2016 г.

Срок действия патента истекает 18 ноября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Патент на изобретение № 2632265

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2632265

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОПРОБОВАНИЯ
МАГНЕТИТОВЫХ РУД**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева" (ОГУ им. И.С. Тургенева) (RU)*

Авторы: *Подмастерьев Константин Валентинович (RU), Баженов Иван Николаевич (RU), Иванов Юрий Борисович (RU)*

Заявка № 2016111578

Приоритет изобретения 28 марта 2016 г.

Дата государственной регистрации в


Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 октября 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 марта 2036 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Акт использования результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор НПАО "Научприбор"

И.В. Блинчиков
" 28 " 04 2017 г.



А К Т

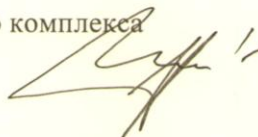
использования результатов диссертационной работы
Баженова Ивана Николаевича

Настоящим актом подтверждается, что на предприятии "Научприбор" используются следующие результаты диссертационной работы Баженова И. Н.:

- 1) алгоритм микропроцессорной обработки сигналов в аппаратуре неразрушающего контроля с автоматической коррекцией инструментальных погрешностей, реализуемой за счет усреднения результатов измерений, получаемых при переключении измерительных каналов за два такта преобразования;
- 2) методика линеаризации характеристики преобразования диагностического устройства, обеспечивающая коррекцию коэффициентов усиления измерительных каналов в зависимости от расстояния до объекта контроля;
- 3) способ применения резонанса для повышения чувствительности датчиков контроля, реализуемый при минимальных аппаратурных затратах.

Указанные результаты диссертационного исследования Баженова И. Н. используются настоящее время при выполнении ОКР по улучшению технологии изготовления высокочувствительной аппаратуры диагностического контроля.

Начальник производственного комплекса
диагностической аппаратуры
28.04.2017 г.



Зилюкин И. В.

Акт внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

АО «НПФ «Спецмаш»

Д.В. Горбунов



05 2017 года

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы
Баженова Ивана Николаевича

Комиссия в составе: председателя – заместителя генерального директора АО «НПФ Спецмаш» Д.В. Горбунов, и членов – начальника конструкторского отдела К.А. Блинова и технического директора А.Л. Самсонова составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Баженова Ивана Николаевича, а именно *алгоритм реализации резонансного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде, инвариантного к геометрическому фактору зондирующего элемента системы контроля и устройство контроля магнитной восприимчивости среды*, имеют практическую ценность и использованы в АО «НПФ «Спецмаш» при выполнении НИОКР. Внедрение указанных результатов диссертационного исследования в экспресс-анализаторы позволило повысить точность оперативного экспрессного контроля массовой доли магнетитового железа в аналитических пробах железосодержащих продуктов.

Председатель комиссии:

Д.В. Горбунов

Члены комиссии:

К.А. Блинов

А.Л. Самсонов

Handwritten signatures in blue ink, corresponding to the names listed next to them.