

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 681.5.08:[658.562:622.34:622.016.2] DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).138-145](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).138-145)

А.А. Азарян, проф., д-р техн. наук, А.А. Трачук, доц., канд. техн. наук,
А. Н. Гриценко, научн. сотр., Д.В. Швець, ассист.

Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина

e-mail: i.am.dmitriy.shvets@gmail.com

Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах

Статья посвящена исследованию вопроса повышения качества оперативного контроля содержания железа в магнетитовых рудах. Проведены исследования для разработки измерительного канала, в ходе которых была разработана конструкция устройства для контроля содержания магнитного железа в разведочных скважинах магнитного каротажа. Определены оптимальные размеры индуктивного датчика, определены схемы преобразователей «напряжение-ток», преобразователя напряжения питания с повышенным КПД. Разработанное устройство опробовано в лабораторных условиях.

каротаж, магнетит, измерительный канал, взрывная скважина

А. А. Азарян, проф., д-р техн. наук, А. А. Трачук, доц., канд. техн. наук, А. Н. Гриценко, науч. співр.,
Д. В. Швець, асист.

Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

Розробка вимірювального каналу для оперативного контролю вмісту заліза магнітного у вибухових свердловинах

Стаття присвячена дослідженню питання підвищення якості оперативного контролю вмісту заліза в магнетитових рудах. Проведено дослідження для розробки вимірювального каналу, в ході яких була розроблена конструкція пристрою для контролю вмісту магнітного заліза в розвідувальних свердловинах магнітного каротажу. Визначено оптимальні розміри індуктивного датчика, визначені схеми перетворювачів «напруга-струм», перетворювача напруги живлення з підвищеним ККД. Розроблений пристрій випробувано в лабораторних умовах.

каротаж, магнетит, вимірювальний канал, вибухова свердловина

Постановка проблемы. На сегодняшний день в условиях жесткой конкуренции на мировых рынках, достаточно важным является вопрос контроля качества добываемого железорудного сырья. Повышенные требования выдвигаются не только к точности контроля содержания железа в нём, но и к оперативности процесса контроля.

Одним из возможных путей совершенствования оперативного контроля содержания железа в железорудном сырье является применение каротажных зондов во взрывных скважинах. В условиях открытой добычи, измерение содержания железа в массивах горной породы с учетом возмущающих факторов, влияющих на точность контроля, является достаточно сложной задачей.

В связи с этим, научные исследования вопроса контроля содержания железа во взрывных скважинах и практическая реализация в данном направлении являются актуальными в современных условиях добычи и переработки железной руды, что обусловлено постоянным ростом требований к качеству конечных продуктов переработки железорудного сырья.

© А.А. Азарян, А.А. Трачук, А. Н. Гриценко, Д.В. Швець, 2019

Анализ последних исследований и публикаций. Существующие методы оперативного контроля содержания полезного компонента в железорудном сырье можно разделить на три типа: ядернофизический [1-4], основанный на взаимодействии гамма-излучения с облучаемой горной массой; магнитометрический [5-7], использующий изменение относительной магнитной проницаемости при взаимодействии с магнитным железом; ультразвуковой [8-10], базирующийся на изменении распространения ультразвуковых волн в исследуемом материале.

Практика показывает, что наиболее подходящими для оперативного контроля качества магнетитовых руд являются именно магнитометрические методы.

Постановка задачи. Задачей исследования является разработка устройства для контроля содержания магнитного железа в разведочных скважинах магнитного каротажа и определение его оптимальных параметров.

Изложение основного материала. Содержание магнетита в железорудном сырье можно определить по его магнитной восприимчивости. Это объясняется тем, что магнитная восприимчивость магнетита на два порядка выше, чем у других минералов, входящих в состав рудных сростков.

Для оперативного контроля магнитной восприимчивости железорудного сырья применяют катушки, индуктивность которых зависит от массы ферромагнитного материала, вносимого в поле катушки.

По минералогическому составу железистых кварцитов магнитная восприимчивость магнетита выше, чем остальных минералов [11], поэтому магнетитовую руду можно квалифицировать как бинарную смесь, где полезный компонент – магнитный, остальные составляющие – немагнитные, следовательно, содержание железа магнитного в железистых кварцитах можно определить магнитной восприимчивостью руды.

Для измерения магнитной восприимчивости рудного материала при использовании магнитометрического метода определения содержания ферромагн. известны следующие методы: индуктивный, индукционный и пондеромоторный.

Индуктивный метод наиболее распространен. Метод основан на изменении индуктивности L электрической измерительной катушки при помещении ферромагнитного материала с некоторой магнитной восприимчивостью χ в переменное магнитное поле, создаваемое данной катушкой:

$$L = f(\chi), \quad (1)$$

или же на изменении взаимной индуктивности M двух магнитосвязанных катушек, если сердечником является исследуемый ферромагнитный материал.

С учетом этого, измерительную катушку (или пару катушек) можно рассматривать как параметрический (требующий источника питания) индуктивный первичный измерительный преобразователь, входным сигналом которого является магнитная восприимчивость вещества, выходным – индуктивность.

Исходные данные для разработки экспериментального образца измерительного канала следующие:

- диапазон контроля содержания массовой доли магнетита от 2 до 60% абс.;
- выходной сигнал аналоговый, токовый от 0 до 5 мА при нагрузке 1 кОм;
- питание измерительного канала осуществляется от стабилизированного источника напряжения +5 В;
- электрическая схема должна быть выполнена на микроощных операционных усилителях для максимального уменьшения потребляемого тока;

- длина скважинного датчика, включающего в себя индуктивный преобразователь и электронный блок, не должна превышать 400 мм;
- допустимая масса скважинного магнитного датчика – не более 0.5 кг;
- магнитный датчик является составной частью комбинированного скважинного снаряда.

Реализация указанных требований предполагает наличие в структуре измерительного канала следующих основных функциональных узлов: индуктивный датчик, измерительный автогенератор, амплитудный детектор, преобразователь «напряжение-ток». Необходимость минимального потребления тока требует применения в схеме микромощных активных элементов, а также преобразователей напряжения с возможно большим КПД, при этом схема, до известных пределов, должна быть максимально упрощена.

При разведке месторождений по взрывным скважинам используются множество методов. Бурение скважин с отбором керна гарантирует получение надежной информации о железистых кварцитах в массиве. Недостатком такого способа получения геологической информации является высокая стоимость буровых работ и необходимость извлечения пустой породы. Более экономичным является бурение без отбора керна с получением необходимой геологической информации по данным каротажа взрывных скважин.

Функциональная схема измерительного канала приведена ниже и состоит из следующих основных узлов. Измерительный автогенератор 1, в колебательный контур которого включены индуктивность датчика L_d и опорная индуктивность $L_{оп}$, коммутаторы 2, 3, амплитудные детекторы 4, 5, аналоговый сумматор 6, преобразователь "напряжение-ток" 7 и преобразователь источника питания 8. Измерительный канал построен по схеме прямого преобразования и предназначен для преобразования индуктивности датчика в уровень выходного блока 7.

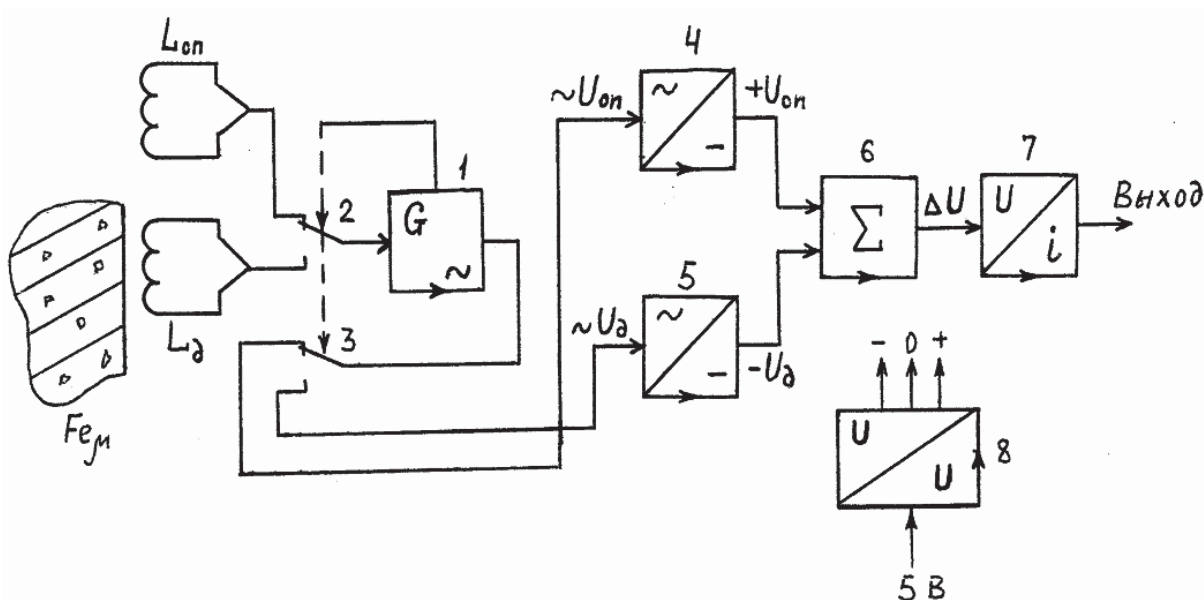


Рисунок 1 – Функциональная схема измерительного канала

Источник: разработано авторами

Принцип работы заключается в следующем. В исходном состоянии измерительный автогенератор 1 вырабатывает гармоническое напряжение частотой 820

Гц и амплитудой, которая определяется величинами индуктивностей L_d и L_{on} . Коммутаторы 2, 3 периодически включают в колебательный контур автогенератора индуктивности L_d и L_{on} , что позволяет получать на выходе автогенератора переменные напряжения $\sim U_d$ и $\sim U_{on}$ с амплитудами, пропорциональными L_d и L_{on} соответственно. Переменные напряжения выпрямляются детекторами 4, 5 с противоположными знаками, суммируются сумматором 6, на выходе которого выделяется напряжения $\Delta U = U_{on} - U_d$, которое преобразуется блоком 7 в уровень выходного тока (в исходном состоянии уровень выходного тока равен 0.2 мА).

При внесении магнитной руды в ближнюю зону датчика L_d индуктивность последнего увеличивается, что приводит к увеличению $\sim U_d$ и соответственно U_d ; величина ΔU на выходе сумматора 6 и выходной ток блока 7 также растет пропорционально приращению индуктивности датчика. При этом функция преобразования измерительного канала описывается уравнением

$$i_{вых} = A + k \cdot Fe_{\mu} , \quad (2)$$

где $i_{вых}$ – выходной ток блока 7 в мА; $A=0.2$ мА; $k=0/083$ мА/%;

Fe_{μ} – содержание массовой доли магнетита, %.

Наличие в схеме специальной опорной цепи (L_{on} , коммутаторы 2,3, детектор 4) позволяет повысить температурную стабильность амплитуды полезного сигнала, который представляет собой разность напряжений от индуктивного датчика L_d и опорной индуктивности L_{on} . Особенностью работы автогенератора 1 является его настройка в областях малых значений эквивалентного сопротивления колебательного контура, что обеспечивает необходимую чувствительность к изменению индуктивности датчика.

Принципиальная схема измерительного канала содержит:

- измерительный автогенератор, состоящий из конвертора отрицательного активного сопротивления с буферным повторителем, к которому подключен параллельный колебательный контур;
- диодные коммутаторы;
- амплитудные детекторы;
- инвертирующий сумматор, состоящий из усилителя, пассивной суммирующей цепи и цепи отрицательной обратной связи;
- преобразователь "напряжение-ток"

В исходном состоянии автогенератор вырабатывает гармоническое напряжение, частота которого определяется емкостью и индуктивностью контура и равна 820 Гц. Амплитуда гармонического напряжения определяется условием существования стационарных колебаний.

Переменное напряжение с контура выпрямляется двумя амплитудными детекторами, причем один детектор выделяет напряжение положительного знака от опорной индуктивности, а второй – напряжение отрицательного знака от датчика. Выпрямленные напряжения складываются сумматором, на выходе которого выделяется разность ΔU напряжений от опорной индуктивности и индуктивности датчика.

При внесении образца магнетитовой руды в ближнюю зону датчика индуктивность увеличивается пропорционально содержанию магнетита в руде. Соответственно увеличивается амплитуда отрицательной полуволны, так как она формируется индуктивностью датчика. Амплитуда положительной полуволны остается неизменной.

Вследствие этого напряжение на выходе детектора увеличивается, что приводит к увеличению разности напряжений на выходе сумматора, пропорционально содержанию магнетита. Соответственно увеличивается выходной ток преобразователя.

Зависимость выходного тока преобразователя от массовой доли железа в горной массе приведена на рисунке 2.

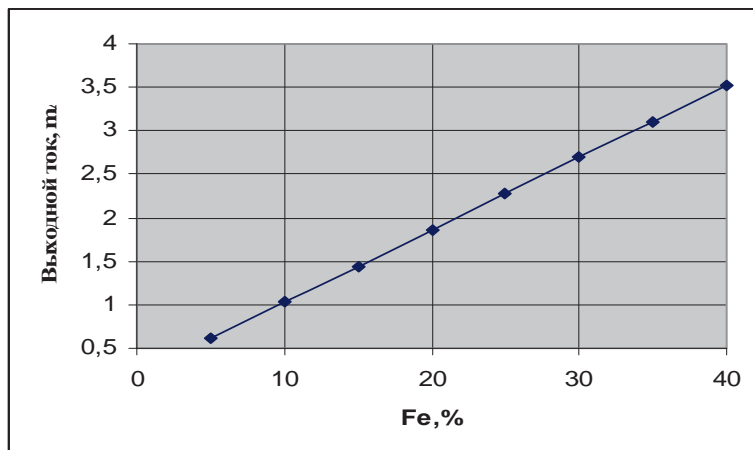


Рисунок 2 – Зависимость выходного тока преобразователя от массовой доли железа в горной массе
Источник: разработано авторами

Уравнение связи:

$$I = 0,083Fe + 0,2 \quad (2)$$

Детерминированный коэффициент:

$$R^2 = 0,99 \quad (3)$$

Видно, что при изменении массовой доли железа в горной массе в пределах 0-40% выходной ток преобразователя меняется в пределах от 0,2 мА до 3,52 мА.

На рисунке 3 приведена зависимость выходного напряжения от массовой доли железа в горной массе.

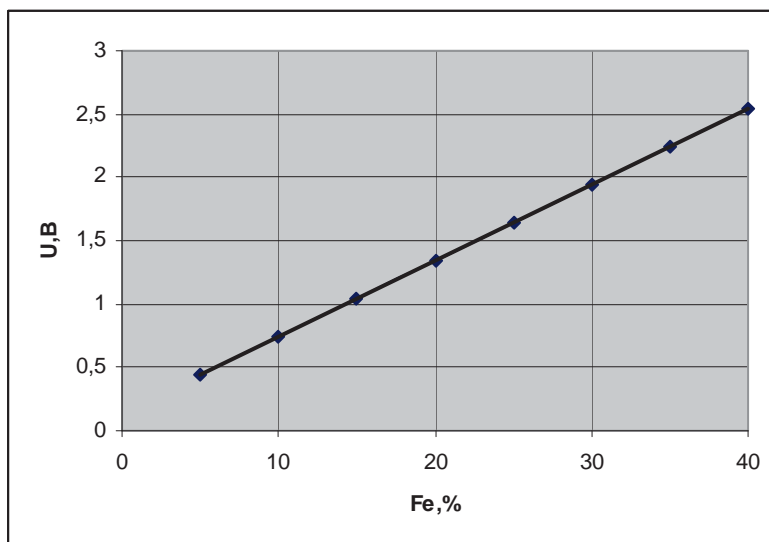


Рисунок 3 – Зависимость выходного напряжения от массовой доли железа в горной массе
Источник: разработано авторами

Получено уравнение связи

$$U = 0,0598Fe + 0,1441 \quad (4)$$

и детерминированный коэффициент

$$R^2 = 0,99. \quad (5)$$

Видно, что при изменении массовой доли железа в горной массе в пределах 0-40% выходное напряжение меняется от 0,23 до 2,54 вольта.

В дифференциальном индуктивном датчике при изменении измеряемого параметра одновременно изменяются индуктивности двух одинаковых катушек, причем изменение происходит на одну и ту же величину, но с обратным знаком.

Индуктивность катушки вычисляется по формуле

$$L = \frac{W\Phi}{I}, \quad (3)$$

где W – число витков;

Φ – пронизывающий ее магнитный поток;

I – проходящий по катушке ток.

Ток связан с МДС соотношением:

$$I = \frac{Hl}{W}. \quad (4)$$

Откуда получаем:

$$L = \frac{W^2}{R_m}, \quad (5)$$

где $R_m = Hl/\Phi$ – магнитное сопротивление индуктивного датчика.

Индуктивный датчик в корпусе скважинного снаряда необходимо герметизировать любым радиочастотным компаундом (рабочая частота у датчика не более 1 кГц), можно использовать парафин. При намотке катушки датчика между поверхностью магнитопровода и обмоткой необходимо расположить тонкую (0.01 мм) пленку из фторопласта, лавсана, полиэтилена и т.п.

Выводы:

- исследованы основные функциональные узлы и разработана принципиальная схема измерительного канала;
- для индуктивного датчика определены оптимальные габариты при сохранении высокой чувствительности к содержанию магнетита в руде;
- исследованы и выбраны схемы преобразователей "напряжение-ток" и преобразователя напряжения питания с повышенным КПД;
- разработана конструкция, изготовлены и испытаны в лабораторных условиях экспериментальные образцы измерительных каналов для контроля содержания магнетита в разведочных скважинах магнитного каротажа скважин большого диаметра (до 350 мм);
- чувствительность измерительного канала, в среднем, составила 10-3 магнитных единиц на один процент содержания магнитного железа.

Список литературы

1. Azaryan A., Azaryan V. Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 1. P. 4-9.
2. Azaryan, A. A., Azaryan, V. A., Trachuk A. A. Quick response quality control of mineral raw materials in the pipeline. *European Science and Technology. Materials of the V International scientific and practice conference*. Munich, Germany. 2013. P. 325–331.

3. Díaz-H, K., Cristancho, F. Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays. *AIP Conference Proceedings 1753, 080001*. 2016. DOI: 10.1063/1.4955371
4. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk A., Shvets D. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5 (95). P. 13-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003
5. Дрига В. В. Разработка математической модели накладного индуктивного датчика для контроля качества железорудного сырья. *Качество минерального сырья*. 2014. С. 112-118.
6. Дрига В. В., Швыдкий А. В. Лабораторное исследование точности измерения устройства оперативного контроля качества железистых кварцитов. *Качество минерального сырья*. 2008. С. 257-261.
7. Дрига В. В. Исследование влияния изменения пространственного расположения рудного материала в магнитном поле накладного индуктивного преобразователя на точность непрерывного контроля качества магнетитовых руд. *Качество минерального сырья*. 2011. С. 64-80.
8. Morkun, V., Morkun N., Tron V., & Hryshchenko S. Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6(5-90). P. 49–58.
9. Поркуян О. В., Сотникова Т. Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. 2010. № 12. Харьков. НТУ "ХПИ". С. 29-36.
10. Morkun, V., Morkun N. Estimation of the Crushed Ore Particles Density in the Pulp Flow Based on the Dynamic Effects of High-Energy Ultrasound. *Archives of Acoustics*. 2018. Vol.43, №1, P. 61-67.
11. Марюта А.Н., Младецкий П.К., Новицкий П.А. Контроль качества минерального сырья. Киев: Техніка, 1976. 220с

Referencis

1. Azaryan, A. & Azaryan, V. (2015). Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials. *Metallurgical and Mining Industry, 1*, 4-9 [in English].
2. Azaryan, A. A., Azaryan, V. A. & Trachuk, A. A. (2013). Quick response quality control of mineral raw materials in the pipeline. *European Science and Technology. Materials of the V International scientific and practice conference*. Munich, Germany [in English].
3. Díaz-H, K. & Cristancho, F. (2016). Effect of sample thickness on 511 keV single Compton-scattered gamma rays. *AIP Conference Proceedings 1753, 080001*. DOI: 10.1063/1.4955371 [in English].
4. Azaryan, A., Gritsenko, A., Trachuk, (2018). A. & Shvets, D. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (95)*, 13-19. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003 [in English].
5. Driga, V.V. (2014). *Razrabotka matematicheskoy modeli nakladnogo induktivnogo datchika dlja kontrolja kachestva zhelezorudnogo syr'ja [Development of the mathematical model of the inductive sensor for monitoring the iron ore quality]*. *Kachestvo mineral'nogo syr'ja* [in Russian].
6. Driga, V.V. & Shvydkyj, A.V. (2008). *Laboratornoe issledovanie tochnosti izmerenija ustrojstva operativnogo kontrolja kachestva zhelezistykh kvarцитов [Laboratory research of measurement accuracy of a device for operative quality control of ferruginous quartzites]*. *Kachestvo mineral'nogo syr'ja* [in Russian].
7. Driga, V.V. (2011). *Issledovanie vlijaniya izmenenija prostranstvennogo raspolozhenija rudnogo materiala v magnitnom pole nakladnogo induktivnogo preobrazovatelja na tochnost' nepreryvnogo kontrolja kachestva magnetitovykh rud [Investigation of the influence of changes in the spatial location of the ore material in the magnetic field of an overhead inductive converter on the accuracy of continuous quality control of magnetite ores]*. *Kachestvo mineral'nogo syr'ja* [in Russian].
8. Morkun, V. S., Morkun, N. V., Tron, V. V., & Hryshchenko, S. M. (2017). Investigation of the effect of characteristics of gas-containing suspensions on the parameters of the process of ultrasonic wave propagation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5-90)*, 49–58 [in English].
9. Porkujan, O. V. & Sotnikova, T. G. (2010). Kombinirovannyj metod opredelenija odnositel'nogo soderzhanija magnetita v tverdoj faze zhelezorudnoj pul'py [Combined method for determining the relative magnetite content in the solid phase of iron ore pulp]. *Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI"* [in Russian].
10. Morkun, V. S. & Morkun, N. V. (2018). Estimation of the Crushed Ore Particles Density in the Pulp Flow Based on the Dynamic Effects of High-Energy Ultrasound. *Archives of Acoustic, Vol.43, 1*, 61-67 [in English].

11. Marjuta, A. N., Mladeckij, P. K. & Novickij, P. A. (1976). *Kontrol' kachestva mineral'nogo syr'ja* [Mineral quality control]. Kiev: Tehnika [in Russian].

Albert Azaryan, Prof., DSc., **Annait Trachuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrey Gritsenko**, Researcher, **Dmitriy Shvets**, Teacher Assistant.

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Development of Measurement Channel for Operational Control of the Content of the Magnetic Iron in the Blast Holes

The article is devoted to the study of improving operational quality control of magnetite ores in explosive wells of magnetic logging. Magnetic logging allows for a detailed study of the structure of the well section by placing a geophysical probe into it. This procedure allows you to determine the content of the useful component in the rock massifs. However, in the conditions of open mining, the measurement of iron content in rock massifs, taking into account disturbing factors affecting the accuracy of control, is a rather complicated task.

The work describes the studies conducted for the development of the measuring channel. In the course of the research, a device was designed to control the content of magnetic iron in exploration wells of magnetic logging. The optimal dimensions of the inductive sensor were determined, the voltage-to-current converter circuits and the supply voltage converter with increased efficiency were determined. The developed device was tested in laboratory conditions.

In this work, the main functional units were investigated and the schematic diagram of the measuring channel has developed. For an inductive sensor, optimal dimensions are determined while maintaining high sensitivity to the magnetite content in the ore. The voltage-current converters and the power supply voltage converter with increased efficiency were investigated and selected. It has developed the design, manufactured and tested in laboratory conditions experimental samples of measuring channels for controlling the content of magnetite in exploration wells of magnetic logging of large diameter wells.

logging, magnetite, measuring channel, blast hole

Одержано (Received) 23.05.2019

Прорецензовано (Reviewed) 28.05.2019

Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019