

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ПОИСКА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ

В.С. Безкоровайный, А.Н. Киреев, И.В. Мирошниченко, А.В. Добрыднєв

В статье представлены результаты исследований феррозондовых сенсоров, которые активно применяются в подводных системах навигации, поиска магнитных аномалий, магнитной съёмки донной поверхности, а также в задачах обнаружения затонувших объектов и разведки подводных месторождений полезных ископаемых. Актуальность работы обусловлена требованиями к быстродействию, энергоэффективности и точности оборудования, эксплуатируемого в сложных гидрологических условиях.

При выполнении исследования в натурных условиях применены результаты математического моделирования по формированию выходного сигнала феррозондового сенсора при однополярном импульсном возбуждении. Установлена взаимосвязь между временем образования максимума выходного сигнала и величиной возбуждающего сигнала на образцах феррозондовых сенсоров с сердечниками из аморфного сплава АМАГ-170, исследования включали в себя регистрацию выходных сигналов сенсоров цифровым осциллографом при варьировании амплитуды однополярного импульсного сигнала возбуждения в пределах 4–14 В при фиксированной длительности импульса 1 мкс.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации режимов работы феррозондовых сенсоров. Зная прогнозируемое время достижения максимума выходного сигнала для определенной амплитуды возбуждения, можно синхронизировать момент опроса сенсора с пиком полезного сигнала. Это позволит обеспечить высокое быстродействие феррозондовых сенсоров за счет применения однополярного импульсного сигнала возбуждения, исключения из обработки неинформативной части сигнала (обратный выброс, шум), снижения нагрузки на вычислительные мощности систем обработки сигнала, тем самым снизить критически важное энергопотребление автономных подводных аппаратов.

Ключевые слова: феррозонд, сенсор, подводные исследования, поиск магнитных аномалий, однополярное импульсное возбуждение, амплитуда сигнала, время образования максимума, магнитный металлодетектор

Введение

Магнитное поле как явление окружающей среды обладает рядом свойств, широко применяемых во многих областях науки и техники. Измерения магнитных полей выполняются различными типами сенсоров (герконы, датчики Холла, индукционные и магниторезистивные сенсоры, SQUID и др.). На фоне такого разнообразия выделяются сенсоры, основанные на магнитомодуляционном эффекте (эффекте магнитного насыщения ферромагнетиков). Такие сенсоры отличаются высокой надежностью, температурной стабильностью, широким динамическим диапазоном, портативностью и простотой изготовления [1–4]. Кроме того, они способны измерять не только скалярную величину, но и направление (вектор) магнитного поля.

Феррозондовые сенсоры (ФС) находят применение в самых разнообразных областях:

– в космонавтике: при изучении магнитных полей планет Солнечной системы и далекого космоса (миссии Voyager 1/2, Galileo, Rosetta, BepiColombo), в исследованиях Марса (Mars Global Surveyor, Tianwen-1, InSight), а также для изучения магнитосферы Земли (аппараты «Интербол», «Метеор-М», «Электро-Л», Cluster, THEMIS) [5–9].

– в промышленности: для неразрушающего контроля, магнитной дефектоскопии, реализации метода магнитной памяти металла. ФС используются в промышленной автоматизации и робототехнике в качестве бесконтактных сенсоров положения, датчиков физических величин, а также для сортировки сплавов и измерения намагниченности материалов [10–12].

– в медицине: для проведения магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии и трекинга при капсульной эндоскопии [13, 14].

Особое место ФС занимают в подводных исследованиях. Исторически одними из первых они начали применяться в военных целях для поиска морских мин и других неразорвавшихся боеприпасов, а также для обнаружения подводных лодок. В дальнейшем ФС нашли широкое применение для выявления слабых магнитных аномалий при поиске затонувших объектов, проведения магнитной съемки донной поверхности [15–18], разведки подводных месторождений полезных ископаемых, контроля геомагнитного поля, а также для навигации и ориентации автономных подводных аппаратов (АПА) по магнитным аномалиям.

В настоящее время на основе ФС, выступающих в качестве первичных преобразователей, успешно эксплуатируются такие устройства, как MAGIC МФ-03-Р, MFMG-1, ТРИТОН, Marine Magnetism SeaSpy-1 [19–21] и др. В условиях подводной археологии, поиска затонувших объектов или инженерных изысканий ФС позволяют фиксировать аномалии магнитного поля с высокой точностью, что критически важно при работе в сложной гидрологической среде.

Именно ФС, совместно с гидролокаторами и подводными камерами, способствовали успеху экспедиции под руководством Роберта Балларда при поиске «Титаника» в 1985 году. В 2003 году с помощью магнитометрии был обнаружен флагман короля Генриха VIII корабль «Mary Rose», затонувший в 1545 году. В 2013 году с помощью системы Marine Magnetism SeaSpy-1 было проведено масштабное исследование затопленной части античной Фанагории, а в 2020 году в Балтийском море магнитное картографирование позволило обнаружить останки немецкого миноносца Т-31 и советского тральщика ТЩ-45, затонувших в Финском заливе в июне 1944 года [17, 18, 22, 23].

Качественное выполнение подводных магнитных измерений, позволяющих обнаруживать такие удивительные находки, требует не только высокой чувствительности сенсоров, но и их высокого быстродействия. При интеграции ФС в высокоскоростные автоматизированные системы, автономные подводные аппараты возникает необходимость в синхронной работе нескольких измерительных устройств, что предъявляет высокие требования к временным характеристикам первичных преобразователей.

В силу особых требований к автономности и минимизации энергопотребления подводных систем оптимальным решением при возбуждении ФС является

использование однополярного импульсного сигнала, который характеризуется малым расходом энергии и высоким быстродействием.

Цель и задачи. Целью данной работы является установление зависимости времени образования максимума выходного сигнала ФС от величины возбуждающего сигнала при однополярном импульсном способе возбуждения. Для достижения поставленной цели проведен анализ математической модели времени образования максимума выходного сигнала ФС, учитывающий явление магнитного насыщения ферромагнитного сердечника, с последующим натурным исследованием временных характеристик выходных сигналов при различной амплитуде возбуждения.

Феррозондовый сенсор — это высокочувствительный датчик магнитного поля, работающий на основе намагничивания сердечников из ферромагнитных материалов.

На сердечники феррозонда намотаны измерительная и возбуждающая обмотки, которые размещаются в специализированном каркасе (рис. 1).

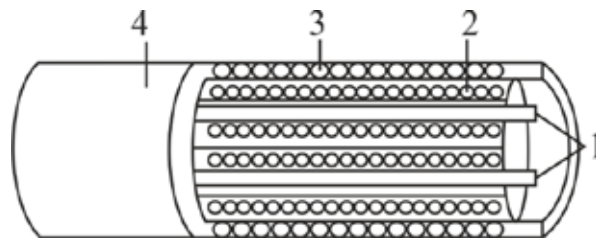


Рис. 1. Конструкция ФС: 1 – ферромагнитные сердечники; 2 – обмотка возбуждения (ОВ); 3 – измерительная обмотка (ИО); 4 – каркас сенсора

Традиционным и наиболее широко применяемым является возбуждение ФС переменным синусоидальным сигналом [24]. Существенным недостатком такого метода является то, что обмотки ФС находятся под постоянным воздействием тока, что приводит к нагреву обмоток и значительному энергопотреблению. При однополярном импульсном возбуждении сигнал подается с определенным интервалом, что позволяет значительно снизить энергопотребление, уменьшить нагрев обмоток ФС, а также повысить их чувствительность [25–27].

■ Математическая модель образования выходного сигнала ФС

В обмотку возбуждения ФС подается импульс напряжения длительностью t_n и амплитудой U_1 , сигнал возбуждения описывается следующей системой уравнений:

$$u_1(t) = \begin{cases} U_1 & \text{при } 0 \leq t \leq t_n \\ 0 & \text{при } t \geq t_n, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_1(t)$ – входной сигнал ФС; U_1 – амплитуда возбуждения; t – время.

Выходной сигнал ФС в таком случае определяется следующим выражением [10]:

$$u_2(t) = \begin{cases} \frac{U_2(H_2)(t-t_1)}{t_m-t_1} & \text{при } t_1 \leq t \leq t_m \\ -\frac{U_2(H_m)(t-t_m)}{t_n-t_m} + U_2(H_2) & \text{при } t_m \leq t \leq t_n \\ U_2(H_4) & \text{при } t \geq t_n, \end{cases} \quad (2)$$

где $u_2(t)$ – выходной сигнал ФС в зависимости от времени;

U_2 – амплитуда выходного сигнала;

H_2, H_4 – напряженность магнитного поля в соответствующие моменты времени;

H_m – максимальная напряженность магнитного поля;

t_1 – время начала формирования выходного сигнала;

t_m – время, при котором выходной сигнал достигает максимальной величины.

Одним из методов повышения эффективности ФС в высокоскоростных магнитоизмерительных системах является минимизация общего времени отклика измерительного преобразователя. Традиционный метод обработки выходного сигнала [10], предполагающий непрерывный анализ всей формы выходного сигнала, предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам и часто не обеспечивает требуемого временного разрешения. В качестве альтернативы используется метод, основанный на дискретном считывании полезного сигнала в строго определенный или заранее прогнозируемый момент времени, который соответствует достижению выходным сигналом своего максимального значения [25, 26].

Временная динамика достижения максимума выходного сигнала ФС с достаточной точностью может быть аппроксимирована кусочно-ломаной функцией. Ключевыми точками излома функции являются моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 (рис. 2) [27].

Время установления в сердечнике ФС заданного значения напряженности магнитного поля определяется следующими выражениями:

$$t_1 = 2\mu_m \tau_0 \ln \frac{H_0}{H_0 - H_1}, \quad (3)$$

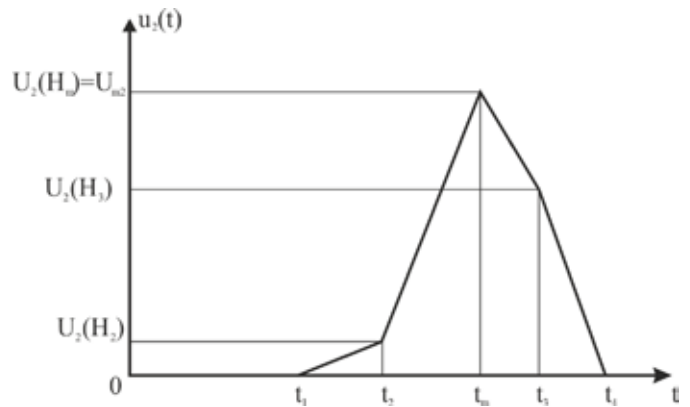


Рис. 2. Аппроксимация времени образования максимума выходного сигнала ФС

$$t_2 = \frac{1}{2} \tau_0 \frac{3\mu_m + \mu_s}{H_0 - H_1} \left[2\Delta H - \frac{\mu_m - \mu_s}{g(3\mu_m + \mu_s)} \sin 2g\Delta H \right] + t_1 \quad (4)$$

$$t_3 = \tau_0 \frac{\mu_m + \mu_s}{H_0 - H_1 - 2\Delta H} \times \left[\frac{\pi}{g} - 2\Delta H + \frac{h}{g} (\sin 3g\Delta H + \sin g\Delta H) \right] + t_2, \quad (5)$$

$$t_4 = \frac{\mu_m + 3\mu_s}{H_0 - H_1 - \frac{\pi}{g}} \left[2\Delta H - \frac{\mu_m - \mu_s}{g(3\mu_m + \mu_s)} \sin 2\Delta H \right] + t_3 \quad (6)$$

$$t_m = \frac{\mu_m + \mu_s}{H_0 - H_m} \times \left\{ H_m - H_1 - 2\Delta H + \frac{h}{g} [\sin(H_m - H_1 - 3\Delta H) + \sin \Delta H] \right\} \quad (7)$$

Здесь μ_m – максимальная магнитная проницаемость материала сердечника;

τ_0 – постоянная времени;

H_1 – напряженность измеряемого магнитного поля;

μ_s – магнитная проницаемость насыщения материала сердечника;

H_0 – поле возбуждения феррозонда;

ΔH – диапазон измеряемой напряженности поля.

■ Материалы натуральных исследований

Исследования проводились на ФС, сердечники которых были изготовлены из аморфного сплава АМАГ-170 размерами 12×1,5×0,025 мм. Диаметр провода обмоток 0,1 мм. Время подачи однополярного импульса составляло 1 мкс. Исследуемые ФС различались количеством витков обмоток.

Для выделения полезной составляющей выходного сигнала использовалась активно-ёмкостная нагрузка [28]. Измерения проводились последовательно при увеличении амплитуды сигнала возбуждения от 4 до 14 В. Дальнейшее повышение напряжения возбуждения приводит к перегреву данных ФС и не исследовалось.

■ Результаты исследований

На рис. 3 представлены осциллограммы выходных сигналов ФС №1, зафиксированные при последовательном увеличении амплитуды возбуждения.

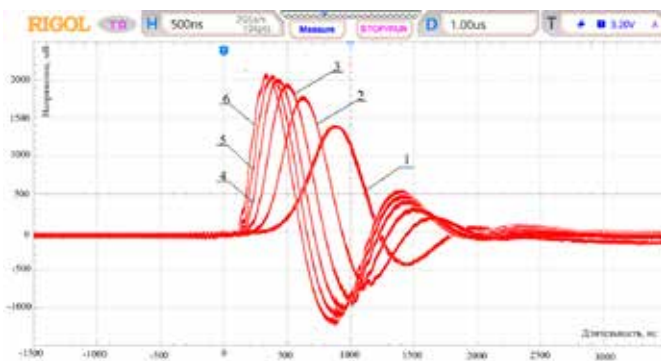


Рис. 3. Выходные сигналы ФС №1 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 – 6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

Полученные данные образования t_m в зависимости от U_1 сведены в таблицу.

Зависимость t_m от U_1 ФС №1

Амплитуда возбуждения, В	4	6	8	10	12	14
Время образования максимума выходного сигнала, нс	880	620	510	430	360	320

Рис. 7. График зависимости времени образования t_m ФС от амплитуды сигнала возбуждения U_1

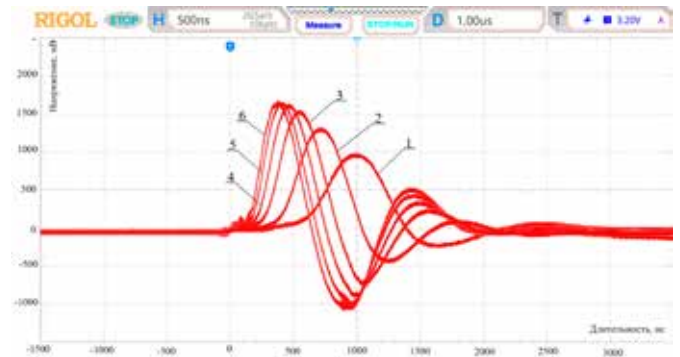
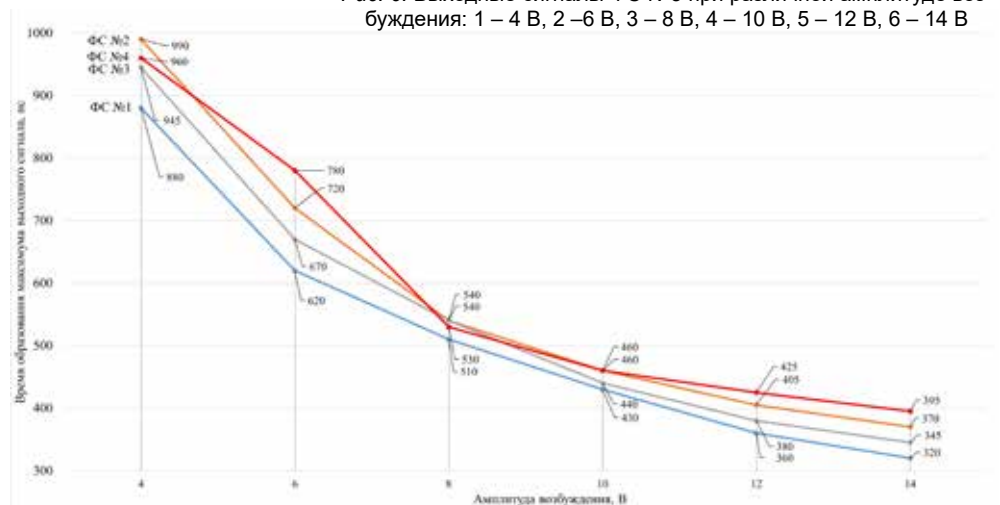


Рис. 4. Выходные сигналы ФС №2 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 – 6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

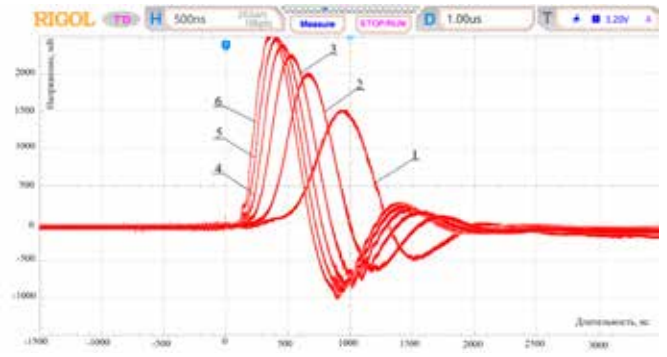


Рис. 5. Выходные сигналы ФС №3 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 – 6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

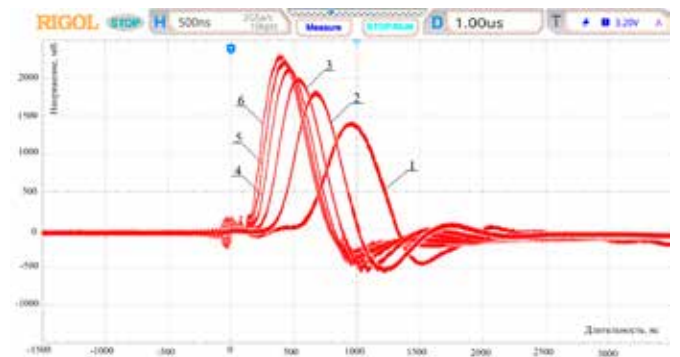


Рис. 6. Выходные сигналы ФС №3 при различной амплитуде возбуждения:
1 – 4 В, 2 – 6 В, 3 – 8 В, 4 – 10 В, 5 – 12 В, 6 – 14 В

Анализ осциллограмм (рис. 3) и данных таблицы, демонстрирует четкую зависимость: при росте напряжения возбуждения от 4 В до 14 В фиксируется уменьшение времени t_m с 880 до 320 нс.

Для подтверждения полученных результатов были проведены дополнительные исследования на других ФС (рис. 4–6).

Для наглядности результатов все значения времени образования максимума t_m выходных сигналов ФС в зависимости от величин входных сигналов возбуждения приведены на графике (рис. 7).

Заключение

В результате исследования установлена нелинейная обратная зависимость времени достижения максимума выходного сигнала ФС от амплитуды однополярного импульса возбуждения.

Подтверждена достоверность представленной математической модели для данных ФС при однополярном импульсном возбуждении.

Установлено, что прогнозирование момента достижения максимума выходного сигнала при известной амплитуде возбуждения позволяет синхронизировать момент опроса сенсора с пиком полезного сигнала, тем самым представляется возможность снизить нагрузку на вычислительные системы.

Практическая реализация полученных результатов может быть использована для:

- оптимизации режимов возбуждения феррозондовых магнитометров в системах поиска подводных объектов;
- разработки алгоритмов адаптивной синхронизации вычислительных систем при работе с ФС;
- повышения автономности магниторазведочных систем за счёт снижения энергопотребления при возбуждении ФС.

Гранты и программы

При финансовой поддержке программы на выполнение научно-исследовательских работ в рамках государственного задания Минобрнауки России (НИ-ОКТР №12511400273-6), на оказание государственных услуг по проекту FREE-2024-0002.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. 2-е изд., перераб. Москва: Наука, 1974. 768 с.
2. Долматова О.А. Датчик Холла, феррозонд и магнорезистивный сенсор: сравнительный анализ и области применения / О. А. Долматова, Т. П. Закиров // Студенческая весна - 2025: сборник научных статей 79-й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2025. С. 95–100. EDN GSVBMR.
3. Ripka P. Review of fluxgate sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 1992. Vol. 33, no. 3. P. 129–141. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80159-Z.
4. Ripka P. Advances in fluxgate sensors // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. Vol. 106–107. P. 8–14. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00148-4.
5. The Cluster Mission: ESA's Spacefleet to the Magnetosphere / ESA Special Publications. 2000. Vol. 450. P. 1–20.
6. Zhang T.L. The fluxgate magnetometer for the Venus Express Mission / T. L. Zhang, G. Berghofer, W. Magnes [et al.] // ESA SP-1295. Noordwijk: ESA, 2008.
7. Babcock E.P. CubeSat Attitude Determination via Kalman Filtering of Magnetometer and Solar Cell Data / E. P. Babcock, T. Bretl // 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Utah, 2011. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2011/all2011/56/>.
8. Heyner D. The BepiColombo Planetary Magnetometer MPO-MAG: What Can We Learn from the Hermean Magnetic Field? / D. Heyner, H. U. Auster, K. H. Glassmeier [et al.] // Space Science Reviews. 2021. Vol. 217, no. 4. Art. 52. DOI: 10.1007/s11214-021-00822-x.
9. Magnetic field experiment for Voyagers 1 and 2 / K.W. Behannon, M. H. Acuña, L. F. Burlaga [et al.] // Space Science Reviews. 1977. Vol. 21, no. 2. P. 235–257.
10. Браверман В.Я. Анализ динамических характеристик феррозондового датчика стыка свариваемых деталей / В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2009. Вып. 25, № 2.
11. Мухаметшин А.М. Контроль состояния и режимов горнотехнологических установок и процессов шахтного производства на основе применения геоинформационной МММ-системы / А. М. Мухаметшин, А. Н. Игнатенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013.
12. Иваненко А.Н. Определение пространственного положения подводных трубопроводов с использованием полноградиентной магнитометрической системы / А. Н. Иваненко, В. В. Архипов, В. А. Сапунов // Вести газовой науки: научно-технический сборник. 2018. № 4(36). С. 94–104. EDN YYTDSX.
13. Масленников Р.О. Стенд для магнитокардиографии на основе феррозондовых датчиков / Р. О. Масленников, А. В. Сучков, И. А. Юрасов // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 11. С. 1519–1523.
14. Новый уровень магнитокардиографии: использование феррозондов в качестве чувствительного элемента / Белорусский национальный технический университет. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/162657>.
15. Coy L. et al. Underwater UXO detection using magnetometry on hovering AUVs // Journal of Field Robotics. 2023. Vol. 40, Issue 4. P. 1045–1067. DOI: 10.1002/rob.22159.
16. Martins A., Almeida J. M., Almeida C., Silva E. P., Dias A., Dias N., Aaltonen J., Heininen A., Koskinen K. T., Rossi C., Domínguez S., Vörös C., Henley S., McLoughlin M., van Moerkerk H., Tweedie J., Bodó B., Zajzon N. UX-1 system design – A robotic system for underwater mining exploration // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): conference proceedings. Madrid, Spain, 2018. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593999.
17. Гусаров, А. В. Магнитная съемка в акватории Фанагории / А. В. Гусаров // Археология и геофизика: новые методы и технологии: материалы междунар. конф. Москва, 2014. С. 45–48.
18. Артефакты со дна: самые удивительные находки Центра подводных исследований РГО / Русское географическое общество. URL: <https://www.vokrugsveta.ru/history/artefakty-so-dna-samyie-udivitelnye-nakhodki-centra-podvodnykh-issledovaniy-rgo-id6562181>.

19. Морской буксируемый феррозондовый магнитометр-градиентометр МФМГ-1: техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ООО «Спектр-Геофизика», 2009. 15 с.
20. Магнитометрический комплекс многоканальный «ТРИТОН». URL: https://granat-e.ru/triton_mag-multichannel.html.
21. Санков О.В., Легкий В.Н. Исследование феррозондовых датчиков магнитных объектов для систем ближней локации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2009. № 2 (75). С. 90–101. EDN: KPNNXP.
22. Uchupi E. Resting in pieces / E. Uchupi, R. D. Ballard, W. N. Lange // Oceanus. 1988. Vol. 31, no. 4. P. 53–60.
23. Wessex Archaeology. Wrecks on the Seabed: Assessment, Evaluation and Recording. Geophysical Survey of Designated Historic Wrecks including Mary Rose, A1 Submarine, Hazardous and Invincible: [отчёт] / Wessex Archaeology; commissioned by English Heritage; supported by Aggregate Levy Sustainability Fund (ALSF). Salisbury: Wessex Archaeology, 2003. Survey dates: 11–26 June 2003.
24. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969. 168 с.
25. Безкоровайный В.С., Ливцов Ю.В., Яковенко В.В., Шатова Н.А. Разработка математической модели образования выходного сигнала феррозонда при однополярном импульсном возбуждении // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 70. С. 190–197.
26. Безкоровайный В.С., Тарасенко О.В., Яковенко В.В., Ивженко А.А. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. 2018. № 4 (10). С. 159–166.
27. Безкоровайный В.С., Яковенко В.В., Швеи С.Н. Способы аппроксимации кривой намагничивания сердечников феррозондов при однополярном импульсном возбуждении // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. EDN: TGUUXZ.
28. Половинка О.Д., Безкоровайный В.С. Влияние активно-ёмкостной нагрузки на функцию преобразования феррозонда // Физические основы приборостроения. 2025. Т. 14, № 1 (55). С. 50–56.

Сведения об авторах:

БЕЗКОРОВАЙНЫЙ Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, руководитель, ведущий научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д. 20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

Тел.: +7(959)529-13-11

E-mail: bezkorvs@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8337-7318

SPIN-код: 9833-5114

Author ID: 1220764

КИРЕЕВ Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: неразрушающий контроль, ультразвуковая диагностика роботизация машин и механизмов

E-mail: lifter_23@mail.ru

Тел.: +7(959)136-70-02

ORCID: 000-0002-7548-3348

SPIN-код: 3172-8780

Author ID: 945387

МИРОШНИЧЕНКО Иван Васильевич, младший научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

E-mail: sensor-3000@mail.ru

Тел.: +7(959)105-88-65

SPIN-код: 5724-9314

Author ID: 1328613

ДОБРЫДНЕВ Алексей Витальевич, младший научный сотрудник

Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Адрес: 291034, г. Луганск, кв-л Молодёжный, д.20А

Область научных интересов: исследование, разработка и применение электромагнитных датчиков для систем мониторинга и диагностики узлов роботизированных машин и механизмов

E-mail: mushroomrace@yandex.ru

Тел.: +7(959)113 -07-08

SPIN-код: 4805-3967

AuthorID: 1264623

Для цитирования:

Безкоровайный В.С., Киреев А.Н., Мирошниченко И.В., Добрыднєв А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ПОИСКА МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2026. № 3 (57). С. 76–83. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09. EDN: LQISAY.



INVESTIGATION OF A FLUXGATE SENSOR FOR DETECTION OF MAGNETIC ANOMALIES

V.S. Bezkorovainyi, A.N. Kireev, I.V. Miroshnichenko, A.V. Dobrydnev

This paper presents the results of research on fluxgate sensors, which are widely used in underwater navigation systems, magnetic anomaly detection, seabed magnetic surveying, as well as in tasks related to the detection of sunken objects and exploration of underwater mineral deposits. The relevance of this work is driven by the requirements for high speed, energy efficiency, and accuracy of equipment operating under complex hydrological conditions.

Within the framework of this study, a mathematical model describing the formation of the output signal of a fluxgate sensor under unipolar pulsed excitation was examined under field conditions. The relationship between the time to reach the maximum output signal and the magnitude of the excitation signal was established using fluxgate sensor samples with cores made of the amorphous alloy AMAG-170. The experimental procedure included recording sensor output signals with a digital oscilloscope while varying the amplitude of the unipolar excitation pulse within the range of 4–14 V at a fixed pulse duration of 1 μ s.

The practical significance of the obtained results lies in the potential for optimizing the operating modes of fluxgate sensors. By knowing the predicted time to reach the maximum output signal for a given excitation amplitude, it becomes possible to synchronize the sensor polling instant with the peak of the useful signal. This approach enables high-speed operation of fluxgate sensors through the use of unipolar pulsed excitation, exclusion of non-informative signal components (reverse overshoot, noise) from processing, reduction of computational load on signal processing systems, and, consequently, a decrease in the critically important power consumption of autonomous underwater vehicles.

Keywords: fluxgate sensor, sensor, underwater research, magnetic anomaly detection, unipolar pulsed excitation, signal amplitude, time to peak formation, magnetic metal detector

References

1. Rosenblat, M. A. Magnetic elements of automation and computing technology / M. A. Rosenblat. 2nd ed., revised. Moscow: Nauka, 1974. 768 p.
2. Dolmatova O.A. Hall sensor, fluxgate, and magnetoresistive sensor: comparative analysis and application areas / O.A. Dolmatova, T.P. Zakirov // Student Spring - 2025: Collection of scientific papers of the 79th Regional Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, St. Petersburg, May 13 15, 2025. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications named after Prof. M. A. Bonch-Bruевич, 2025. P. 95 100. EDN GSVBMR.
3. Ripka P. Review of fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A: Physical. 1992. Vol. 33, No. 3. P. 129-141. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80159-Z.
4. Ripka P. Advances in fluxgate sensors / P. Ripka // Sensors and Actuators A: Physical. 2003. Vol. 106–107. P. 8–14. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00148-4.
5. The Cluster Mission: ESA's Spacefleet to the Magnetosphere // ESA Special Publications. 2000. Vol. 450. P. 1–20.
6. Zhang T.L. The fluxgate magnetometer for the Venus Express Mission / T.L. Zhang, G. Berghofer, W. Magnes [et al.] // ESA SP-1295. Noordwyk: ESA, 2008.
7. Babcock E.P. CubeSat Attitude Determination via Kalman Filtering of Magnetometer and Solar Cell Data / E. P. Babcock, T. Bretl // 25th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Utah, 2011. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2011/all2011/56/>.
8. Heyner D. The BepiColombo Planetary Magnetometer MPO-MAG: What Can We Learn from the Hermean Magnetic Field? / D. Heyner, H. U. Auster, K. H. Glassmeier [et al.] // Space Science Reviews. 2021. Vol. 217. No. 4. Art. 52. DOI: 10.1007/s11214-021-00822-x.
9. Magnetic field experiment for Voyagers 1 and 2 / K. W. Behannon, M.H. Acuña, L.F. Burlaga [et al.] // Space Science Reviews. 1977. Vol. 21. No. 2. P. 235–257.
10. Braverman V.Ya. Analysis of dynamic characteristics of a fluxgate sensor for the joint of welded parts / V.Ya. Braverman, V.S. Belozertsev // Vestnik of Siberian State Aerospace University. 2009. Iss. 25. No. 2.
11. Mukhametshin A.M. Monitoring the state and modes of mining technology installations and processes of mining production based on the application of a geoinformation MMM-system / A.M. Mukhametshin, A. N. Ignatenko // Mining Information and Analytical Bulletin. 2013.
12. Ivanenko A.N. Determination of the spatial position of underwater pipelines using a full-gradient magnetometric system / A.N. Ivanenko, V.V. Arkhipov, V.A. Sapunov // Scientific and Technical Collection. Vesti of Gas Science. 2018. No. 4(36). P. 94–104. EDN YYTDSX.
13. Maslennikov R.O. Test bench for magnetocardiography based on fluxgate sensors / R.O. Maslennikov, A.V. Suchkov, I.A. Yurasov // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2020. Vol. 84. No. 11. P. 1519–1523.
14. A new level of magnetocardiography: the use of fluxgates as a sensing element / Belarusian National Technical University. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/162657>.

15. Coy L. Underwater UXO detection using magnetometry on hovering AUVs / L. Coy [et al.] // *Journal of Field Robotics*. 2023. Vol. 40, Iss. 4. P. 1045–1067. DOI: 10.1002/rob.22159.

16. Martins A. UX-1 system design – A robotic system for underwater mining exploration / A. Martins, J.M. Almeida, C. Almeida [et al.] // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): conference proceedings. Madrid, Spain, 2018. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593999.

17. Gusarov A.V. Magnetic survey in the Fanagoria water area / A.V. Gusarov // *Archaeology and Geophysics: New Methods and Technologies: proceedings of the international conference*. Moscow, 2014. P. 45–48.

18. Artifacts from the bottom: the most amazing finds of the Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society / Russian Geographical Society. URL: <https://www.vokrugsveta.ru/history/artefakty-so-dna-samyie-udivitelnye-nakhodki-centra-podvodnykh-issledovaniy-rgo-id6562181>.

19. Marine towed fluxgate magnetometer-gradiometer MFMG-1: technical description and operation manual. Moscow: Spektr-Geofizika LLC, 2009. 15 p.

20. "TRITON" multichannel magnetometric complex [Electronic resource]. https://granat-e.ru/triton_mag-multichannel.html.

21. Sankov O.V. Investigation of fluxgate sensors of magnetic objects for near-field location systems / O. V. Sankov, V. N. Legkiy // *Vestnik of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. 2009. No. 2 (75). P. 90–101. EDN: KPNNXP.

22. Uchupi E. Resting in pieces / E. Uchupi, R. D. Ballard, W. N. Lange // *Oceanus*. 1988. Vol. 31. No. 4. P. 53–60.

23. Wessex Archaeology. Wrecks on the Seabed: Assessment, Evaluation and Recording. Geophysical Survey of Designated Historic Wrecks including Mary Rose, A1 Submarine, Hazardous and Invincible: [report] / Wessex Archaeology; commissioned by English Heritage; supported by Aggregate Levy Sustainability Fund (ALSF). Salisbury: Wessex Archaeology, 2003. Survey dates: 11–26 June 2003.

24. Afanasyev Yu. V. Fluxgates / Yu. V. Afanasyev. Leningrad: Energiya, 1969. 168 p.

25. Bezkorovainyi V.S. Development of a mathematical model for the output signal formation of a fluxgate under unipolar pulse excitation / V. S. Bezkorovainyi, Yu. V. Litvov, V. V. Yakovenko, N. A. Shatova // *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2019. No. 70. P. 190–197.

26. Bezkorovainyi V.S. Transfer function of a fluxgate with unipolar pulse excitation / V.S. Bezkorovainyi, O.V. Tarasenko, V.V. Yakovenko, A.A. Ivzhenko // *Vestnik of Luhansk National University named after V. Dahl*. 2018. No. 4 (10). P. 159–166.

27. Bezkorovainyi V.S. Methods for approximating the magnetization curve of fluxgate cores under unipolar pulse excitation / V.S. Bezkorovainyi, V.V. Yakovenko, S.N. Shvets // *Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 5. P. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. EDN: TGUUXZ.

28. Polovinka O.D. Effect of active-capacitive load on the transfer function of a fluxgate / O.D. Polovinka, V.S. Bezkorovainyi // *Physical Fundamentals of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 14. No. 1 (55). P. 50–56.



Recommended citation:

Bezkorovainyi V.S., Kireev A.N., Miroshnichenko I.V., Dobrydnev A.V. INVESTIGATION OF A FLUXGATE SENSOR FOR DETECTION OF MAGNETIC ANOMALIES. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2026. No. 3 (57). C. 76–83. DOI: 10.37102/1992-4429_2026_57_03_09. EDN: LQISAY.

Information about authors

BEZKOROVAINYI Vladimir Sergeevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D. equivalent), Associate Professor, Head, Leading Researcher

Youth Scientific Research Laboratory "Progress"

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"

Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A

Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms

Tel. +7 (959) 529-13-11

E-mail: bezkorvs@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8337-7318

SPIN-code: 9833-5114

Author ID: 1220764

KIREEV Andrey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences (Dr. Sci./D.Sc. equivalent), Chief Researcher, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"

Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A

Research interests: Non-destructive testing, ultrasonic diagnostics, and robotics of machines and mechanisms

E-mail: lifter_23@mail.ru

Phone: +7 (959) 136-70-02

ORCID: 0000-0002-7548-3348

SPIN-code: 3172-8780

Author ID: 945387

MIROSHNICHENKO Ivan Vasilievich, Junior Researcher

Youth Scientific Research Laboratory "Progress"

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"

Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A

Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms

E-mail: sensor-3000@mail.ru

Phone: +7 (959) 105-88-65

SPIN-code: 5724-9314

Author ID: 1328613

DOBRYDNEV Alexey Vitalievich, Junior Researcher

Youth Scientific Research Laboratory "Progress"

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lugansk State University named after Vladimir Dal"

Address: 291034, Lugansk, Molodezhny Quarter, Bldg. 20A

Research interests: Research, development, and application of electromagnetic sensors for monitoring and diagnostic systems of robotic machines and mechanisms

E-mail: mushroomrace@yandex.ru

Phone: +7 (959) 113-07-08

SPIN-code: 4805-3967

Author ID: 1264623