

и молодых ученых, Тюмень, 24–28 апреля 2017 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. – С. 263–266.

6. Система контроля качества электроэнергии / Р. А. Соколов, А. А. Емельянов, В. В. Агеев, Е. В. Шанин // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Тюмень, 22 декабря 2016 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016. – С. 398-402.

УДК 620.179.143.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФЕРРОЗОНДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Архипов Егор Дмитриевич, Левшин Михаил Артемович, Сутормин Игорь Витальевич,
Шумкова Евгения Алексеевна*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: eas105@tpu.ru

STUDY OF THE SENSITIVITY OF THE FLUXGATE MAGNETOMETER

*Arkhipov Egor Dmitrievich, Levshin Mikhail Artemovich, Sutormin Igor Vitalievich,
Shumkova Evgenia Alekseevna*

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Аннотация: статья посвящена изучению нового способа аппроксимации кривой намагничивания для практического использования при проектировании феррозондового датчика. В работе были получены аналитические зависимости чувствительности датчика посредством математического анализа и компьютерного моделирования. Практическая значимость работы заключается в возможности оценки зависимости таких параметров, как линейность и чувствительность проектируемого феррозондового преобразователя, от параметров кривой намагничивания и сигнала возбуждения.

Abstract: the paper contemplates a new method of approximation of the magnetization curve for practical use in the design of a fluxgate sensor. Analytical dependences of sensor sensitivity were obtained in the work by mathematical analysis and computer modeling. The practical significance of the work is the possibility of estimating the dependence of such parameters as linearity and sensitivity of the designed fluxgate converter from the parameters of the magnetization curve and the drive signal.

Ключевые слова: феррозонд; чувствительность; кривая намагничивания; математический анализ; моделирование физических процессов.

Keywords: fluxgate; sensitivity; magnetization curve; mathematical analysis; simulation of physical processes.

Измерение слабых магнитных полей (от 10^{-11} до 10^{-4} Тл) является важной задачей в области медицины, геофизическом и космическом исследованиях, навигации, стабилизации и ориентации [1].

Феррозондовый датчик используется прежде всего для измерения постоянных или медленно изменяющихся магнитных полей. Принцип его работы основан на законе электромагнитной индукции Фарадея.

Дифференциальный феррозонд представляет собой два ферромагнитных сердечника, на которые намотаны первичные обмотки таким образом, чтобы внутри сердечников создавались встречные магнитные поля. Для измерения итогового магнитного поля в сердечниках, поверх данной системы находится измерительная обмотка. При отсутствии внешнего магнитного поля, поля, создаваемые первичными обмотками, компенсируют друг

друга, а при его наличии, величина внешнего магнитного поля определяется амплитудой второй гармоники выходной ЭДС с измерительной обмотки.

Для расчёта высокочувствительного феррозондового магнитометра необходимо аналитически описать его действие и создать математическую модель. Однако математический расчет феррозонда и оценка его чувствительности являются достаточно сложной задачей, поскольку феррозонд представляет собой нелинейный преобразователь, содержащий ферромагнитный сердечник.

Для создания аналитической модели кривой намагничивания ферромагнетика используются различные функции: степенной полином n -ой степени, арктангенс и другие [2]. В работе была рассмотрена аппроксимация кривой намагничивания функцией ошибок и полученная на ее основе зависимость чувствительности датчика от величины поля возбуждения. Результаты сравнивались с ранее известными аналитическими и экспериментальными зависимостями чувствительности [3].

Использование функции ошибок в качестве аппроксимации кривой намагничивания имеет ряд преимуществ, по сравнению с распространенной полиномиальной моделью, поскольку последняя не описывает состояние сердечника в области, близкой к насыщению, так как обладает неограниченным ростом при увеличении значения своего аргумента. Функция ошибок, в свою очередь, обладает двумя четко выраженными асимптотами, что позволяет получать значения магнитной индукции, при любом напряжении магнитного поля в сердечнике.

Зависимость выходного сигнала от времени при аппроксимации кривой намагничивания полиномом третьей степени выражается формулой (1):

$$\varepsilon(t) = 6\omega \cdot b \cdot s \cdot w_2 \cdot H_0 \cdot H_m^2 \cdot \sin(2\omega t), \quad (1)$$

где b – коэффициент, зависящий от материала и формы сердечника;

H_0 – значение напряженности, вызываемое в сердечнике внешним полем, А/м;

H_m – значение напряженности, вызываемое в сердечнике полем возбуждения, А/м;

ω – циклическая частота входного сигнала, рад/с.

Зависимость выходного сигнала от времени при аппроксимации кривой намагничивания функцией ошибок выражается формулой (2):

$$\varepsilon(t) = A \cdot \operatorname{sh}(2H_0 \cdot H_m \cdot \sin(\omega t)) \cdot \cos(\omega t) \cdot \exp\left(\frac{H_m^2}{2} \cdot \cos(2\omega t) - B\right), \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметров сердечника и поля возбуждения;

B – коэффициент, зависящий от внешнего поля и поля возбуждения;

H_0 – значение напряженности, вызываемое в сердечнике внешним полем, А/м;

H_m – значение напряженности, вызываемое в сердечнике полем возбуждения, А/м;

ω – циклическая частота входного сигнала, рад/с.

С помощью представленных формул были получены зависимости чувствительности феррозондового преобразователя от значения поля возбуждения. В результате сравнения кривых установили, что график чувствительности при аппроксимации функцией ошибок обладает пиковым значением при определённой величине входного сигнала, в отличие от чувствительности датчика, получившейся при использовании полиномиальной аппроксимации, которая монотонно возрастает с увеличением амплитуды сигнала возбуждения (см. рисунок 1).

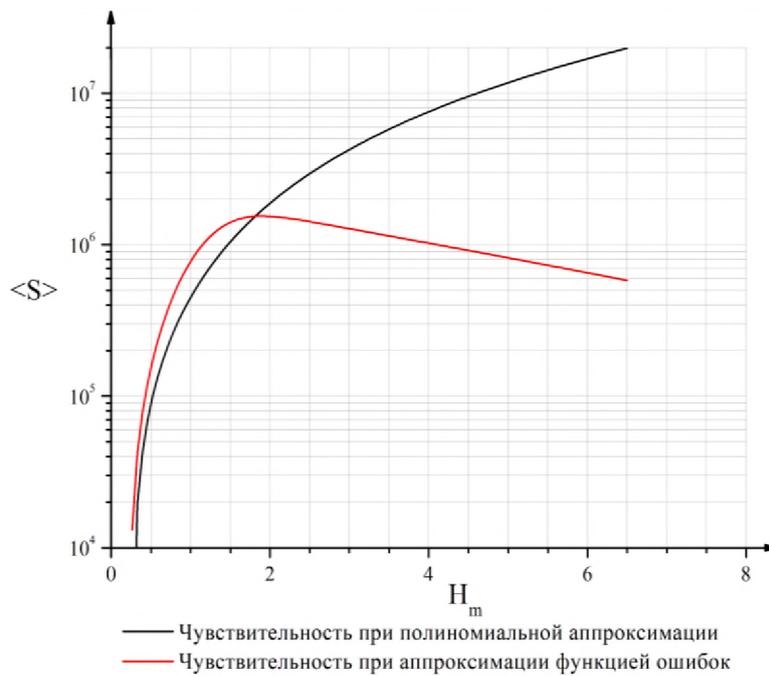


Рисунок 1 – Аналитические зависимости чувствительности от амплитуды сигнала возбуждения

Для подтверждения полученных аналитических зависимостей было проведено физическое моделирование феррозондового преобразователя в среде Comsol MultiPhysics. Трёхмерная модель датчика представлена на рисунке 2.

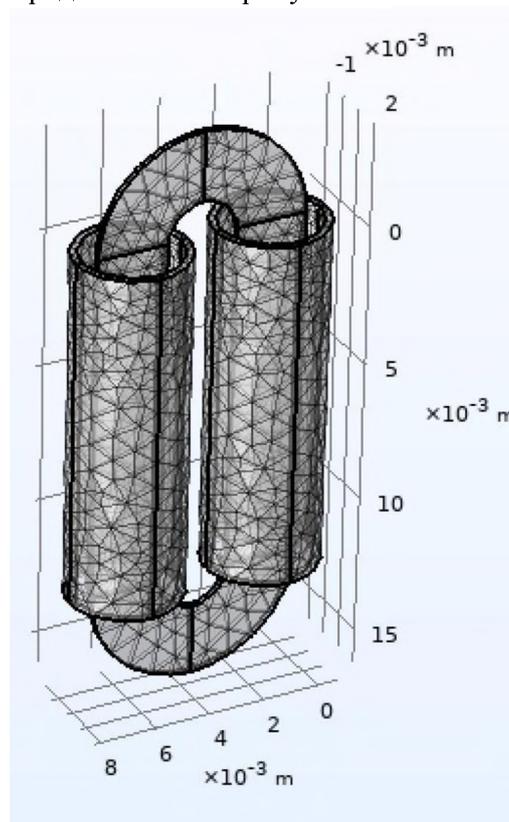


Рисунок 2 – Модель феррозонда в программе Comsol Multiphysics

Значения параметров сердечника феррозонда представлены в таблице. В качестве модели кривой гистерезиса для моделирования в Comsol была выбрана модель магнитного гистерезиса Джайлса-Атертона [4, 5].

Таблица – Значения параметров сердечника, выбранных для моделирования

Параметр	Значение	Единица измерения
Электрическая проводимость	1	См/м
Относительная диэлектрическая проницаемость	1	1
Намагниченность насыщения	1E+06	А/м
Плотность доменных стенок	1	А/м
Потеря фиксации	1	А/м
Обратимость намагниченности	0.5	1
Междоменная связь	1E-06	1

В результате моделирования феррозондового датчика, при различных величинах полей возбуждения были получены значения амплитуды второй гармоники выходного сигнала. По этим значениям была вычислена чувствительность преобразователя в зависимости от входного сигнала. Результат показан на рисунке 3. Из полученного графика видно, что чувствительность, также, как и в случае аппроксимации кривой намагничивания функцией ошибок, имеет пиковое значение при определенном значении магнитодвижущей силы, равной произведению числа витков на протекающий через эти витки ток.

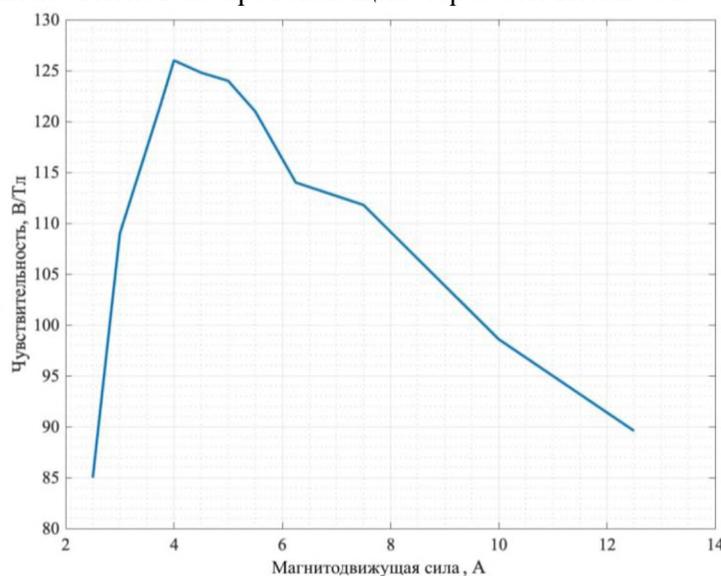


Рисунок 3 – Зависимость чувствительности феррозонда в зависимости от поля возбуждения, полученная в Comsol MultiPhysics

Полученные аналитически результаты отражают реальные свойства феррозондовых преобразователей, а именно наличие максимума чувствительности при некотором значении поля возбуждения.

Таким образом, модель феррозондового преобразователя, полученная на основе функции ошибок, способна более точно описать поведение датчика в состоянии насыщения его сердечника. Следовательно, аппроксимацию функцией ошибок целесообразно использовать в тех случаях, когда предполагается, что сердечник феррозонда будет выходить в насыщение.

Предполагается, что полученную модель возможно использовать на стадии проектирования феррозондового магнитометра, для анализа интервала линейности и чувствительности в зависимости от параметров кривой намагничивания сердечника и сигнала возбуждения.

Список литературы

1. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka // Location: Boston, Artech house, 2000. – 494 p.
2. Матюк, В. Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Часть I. Анализ моделей / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2. – С. 3–35.
3. Афанасьев, Ю. В. Феррозонды / Ю. В. Афанасьев. – Л: Энергия, 1969. – 169 с.
4. Kolomeitsev, A. Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology / A. Kolomeitsev, I. Zatonov et al. // Devices and Methods of Measurements. – 2021. – Vol. 12. – N.2. P. – 117–123.
5. Kolomeitsev A. The Fluxgate Magnetometer Simulation in Comsol Multiphysics / A. Kolomeitsev, P. Baranov, I. Zatonov // МАТЕС Web of Conferences (IME&T 2017). – 2018. – Vol. 155, 01005.

УДК 006.86

ОСНОВНЫЕ ОТСТУПЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ НА УЧАСТКАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Бакулина Валерия Евгеньевна, Тимофеев Егор Николаевич
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
E-mail: lbakulina@list.ru

Научный руководитель: Кочетков Антон Сергеевич,
к.т.н., доцент кафедры электротехника метрология и сертификация СГУПС

MAJOR RAIL TRACK GEOMETRY DEVIATIONS ON SECTIONS OF THE WEST SIBERIAN RAILWAY

Bakulina Valeria Evgenievna, Timofeev Egor Nikolaevich
Siberian State Transport University, Novosibirsk

Scientific advancer: Kochetkov Anton Sergeevich,
Ph.D., Associate Professor, Department of Electrical Engineering Metrology and Certification STU

Аннотация: диагностика и мониторинг рельсовой колеи являются одними из ключевых операций в комплексе обслуживания всей железнодорожной инфраструктуры. На дороге существует множество путеизмерительных средств и в том числе их совокупности в исполнении вагонов. В статье произведен анализ и распределение по распространённости основных отступлений геометрии рельсовой колеи на Западно-Сибирской железной дороге в период с 2021 по 2022 год по средствам контрольных проходов вагона-путеизмерителя «Декарт». Неисправности в части геометрии рельсовой колеи служат причиной к ограничению скоростей или к закрытию данного пути для подвижных составов.

Abstract: track diagnostics and monitoring are amongst the key operations in the entire railway infrastructure maintenance complex. There are many track gauges on the road, including their combination in railcar design. There is the analysis and distribution by prevalence of the main deviations of rail track geometry on the West Siberian railway during the period from 2021 to 2022 by means of control passages of track measuring car "Deckart". Faults in rail gauge geometry will result in speed restrictions or the closure of the track to rolling stock.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, геометрия рельсовой колеи, вагон-путеизмеритель, отступления, диагностика и мониторинг.

Keywords: Railway track, track geometry, track measuring car, deviations, diagnostics and monitoring.

Безопасные и качественные перевозки грузов и пассажиров – это одно из основных направлений Стратегии развития железнодорожного транспорта России до 2030 года [1].