

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ФЕРРОЗОНДОМ ПРИ ОДНОПОЛЯРНОМ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

© Д. И. Ильинский¹, Д. А. Гостищев^{1✉}, В. С. Безкоровайный^{1,2}

¹ Молодежная научно-исследовательская лаборатория «Прогресс»,
gostdi@yandex.ru;

² кафедры «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный
университет имени Владимира Даля», Луганск, Луганская Народная Республика,
Российская Федерация

Ключевые слова: катушка подмагничивания; компенсационная обратная связь; магнитометр; магнитное поле; феррозонд.

Аннотация: Представлен способ расширения динамического диапазона измерений ферромодуляционных чувствительных сенсоров на основе сердечника из аморфных сплавов, использующих возбуждение однополярными прямоугольными импульсами. Ключевой проблемой, решаемой в работе, является ограниченная зона линейности традиционных ферромодуляционных чувствительных сенсоров, приводящая к значительным погрешностям при измерении сильных и слабых магнитных полей. Предложено решение, заключающееся в реализации активной компенсационной системы с катушкой компенсационного подмагничивания, принципиальное отличие которой – поддержание результирующего магнитного поля на сердечнике не на нулевом уровне, а в фиксированной точке, соответствующей центру условно-линейного участка функции преобразования ферромодуляционного чувствительного сенсора. Техническая реализация включает цифровой контур управления на базе микроконтроллера, который анализирует сигнал рассогласования от амплитудного детектора, преобразованного аналого-цифровым преобразователем, и формирует управляющее воздействие через цифро-аналоговый преобразователь. Отмечено, что точность системы обеспечивается прецизионным измерением тока датчиком и алгоритмом цифровой компенсации дрейфа.

Введение

Расширение динамического диапазона измерений магнитных полей остается критической задачей для современных технологий, охватывающих области от геофизической разведки до медицинской диагностики: в геофизике – необходимость детектирования слабых аномалий на фоне сильных полей рудных тел, в энергетике – контроль токов в высоковольтных шинах и т.д. [1, 2]. Датчик магнитного поля является основным элементом любого магнитометра и предназначен для преобразования магнитной индукции в электрический сигнал. При создании датчиков магнитного поля используются различные физические эффекты, например, Холла, Гаусса, Суля и др. Однако фундаментальные ограничения современных магнитных сенсоров, включая узкий рабочий диапазон, нелинейность преобразования, температурную нестабильность и дрейф нуля, препятствуют созданию универсальных измерительных систем, обеспечивающих высокоточные измерения в широком диапазоне напряженностей магнитных полей [3 – 5].

Цель работы – разработка способа расширения динамического диапазона измерений ферромодуляционных чувствительных сенсоров с помощью компенсационной катушки подмагничивания при однополярном импульсном возбуждении.

Анализ конструкции ферромодуляционных чувствительных сенсоров

Перспективной технологией для создания магнитометра являются ферромодуляционные чувствительные сенсоры (ФМЧС) [6, 7]. Работа ФМЧС базируется на изменении магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника под влиянием внешнего магнитного поля. Это фундаментальное отличие от датчиков Холла, которые реагируют на статическое поле [8], позволяющее ФМЧС регистрировать динамические изменения магнитного поля. Благодаря этому сенсоры способны детектировать не только положение, но и деформации объектов. Ключевым элементом ФМЧС служит сердечник из магнитомягкого материала с высокой магнитной проницаемостью, например, пермаллоя, аморфного железа или нанокристаллических сплавов [9 – 11].

Среди важных эксплуатационных преимуществ ФМЧС выделяются:

- нечувствительность к немагнитным загрязнениям: наличие слоев масла, грязи, краски или пыли не искажает результаты измерений, поскольку магнитное поле проникает через такие среды;

- расширенный температурный диапазон: возможность работы при температурах от -100 до $+175$ °С [12] обеспечивает применение ФМЧС в суровых условиях.

Конструктивно ФМЧС содержит обмотку возбуждения, на которую подается однополярный импульсный сигнал, и измерительную катушку, амплитуда которой пропорциональна напряженности магнитного поля. Однако линейность этой зависимости сохраняется лишь в узком диапазоне, после чего сердечник входит в насыщение. Для устранения этого ограничения вводится третья обмотка – катушка компенсационного подмагничивания (ККП) (рис. 1).

Система компенсации основана на поддержании постоянного результирующего поля в сердечнике, находящегося в центре условно-линейного участка функции преобразования [13]. На рисунке 2 изображена функция преобразования ФМЧС без применения ККП, снятая с помощью амплитудного детектора.

Формула, определяющая оптимальное значение $H_{ц}$, выглядит следующим образом:

$$H_{ц} = H_{ст} + H_{ККП} ,$$

где $H_{ц}$ – оптимальное значение, соответствующее центру условно-линейного участка функции преобразования, $H_{ц} = 100$ А/м; $H_{ст}$ – измеряемое стороннее магнитное поле; $H_{ККП}$ – прикладываемое магнитное поле ККП.

Для испытаний прототипа магнитометра использован ФМЧС с параметрами ККП: длина 10 мм, медная проволока $\varnothing 0,2$ мм, 2 слоя намотки, 100 витков. При токе компенсации 10 мА создаваемое магнитное поле ККП составило 100 А/м, что соответствует расчетному значению:

$$H_{ККП} = \frac{IW}{L} = \frac{0,01 \cdot 100}{0,01} = 100 \text{ А/м},$$

где I – ток компенсации, А; W – количество витков; L – длина ККП, м.

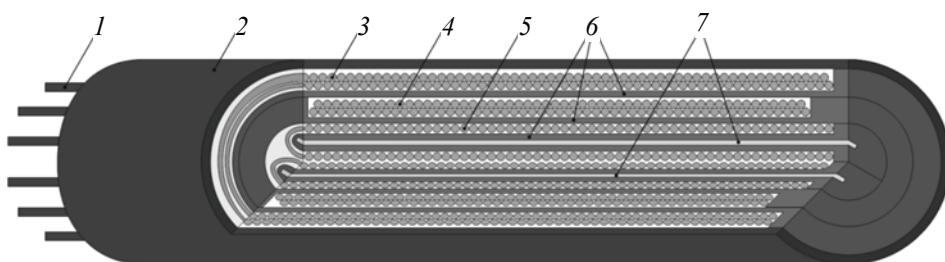


Рис. 1. Схема ферромодуляционного чувствительного сенсора:

1 – выводные контакты; 2 – внешний каркас; 3 – ККП; 4 – измерительная катушка; 5 – обмотка возбуждения; 6 – внутренние каркасы; 7 – ферромагнитные сердечники

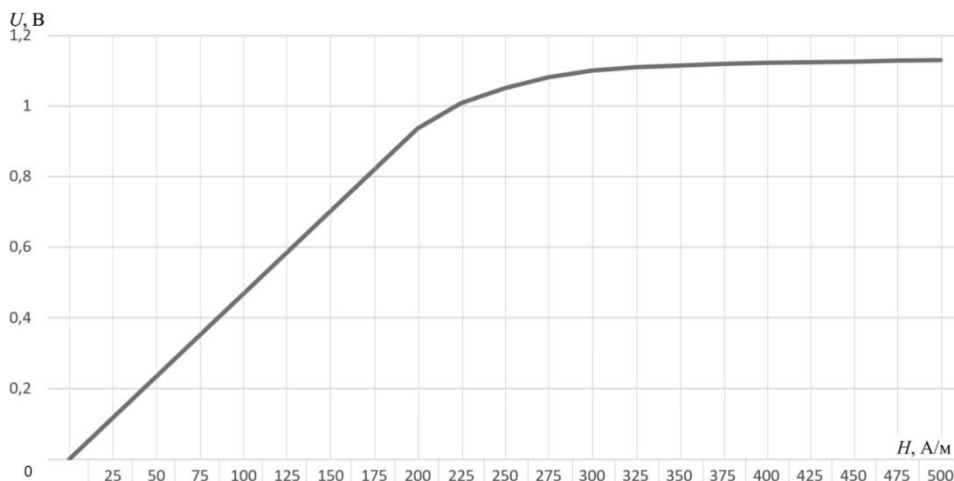


Рис. 2. Функция преобразования ФМЧС без ККП

Принцип работы магнитометра

Техническая реализация работы магнитометра (рис. 3) заключается в непрерывном отслеживании пика амплитуды выходного сигнала ФМЧС и тока компенсации, прикладываемого к ККП.

В состав аппаратной части магнитометра входят: катушка компенсационного подмагничивания 1, ФМЧС 2, генератор однополярных импульсных сигналов (ГС) 3, микроконтроллер (МК) 4, блок индикации (БИ) 5, датчик тока (ДТ) 6, амплитудный детектор (АД) 7, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 8, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 9 и источника тока (ИТ) 10.

Генератор однополярных импульсных сигналов возбуждения [14] служит для создания рабочего переменного магнитного поля ФМЧС. Поскольку ФМЧС реагируют на динамические изменения магнитного потока, его выходной сигнал может изменяться быстро. Для его точного оцифровывания применяется амплитудный детектор, который преобразовывает высокочастотный в низкочастотный модулирующий сигнал, необходимый для минимизации помех и работы АЦП (рис. 4). Алгоритм микроконтроллера непрерывно отслеживает сигнал рассогласования $\Delta U = U_{\text{вых}} - U_{\text{к}}$, где $U_{\text{к}}$ соответствует калиброванному напряжению $H_{\text{ц}}$. Микроконтроллер вычисляет управляющее воздействие для ЦАП, тем самым корректируя работу источника тока. Для более точного расчета генерируемого магнитного поля ККП, микроконтроллер отслеживает истинный протекающий ток с помощью датчика тока.

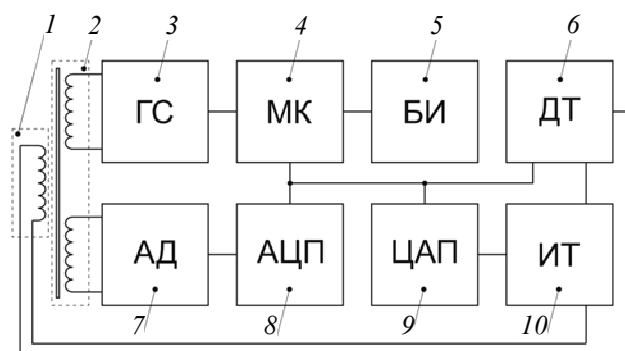


Рис. 3. Схема магнитометра

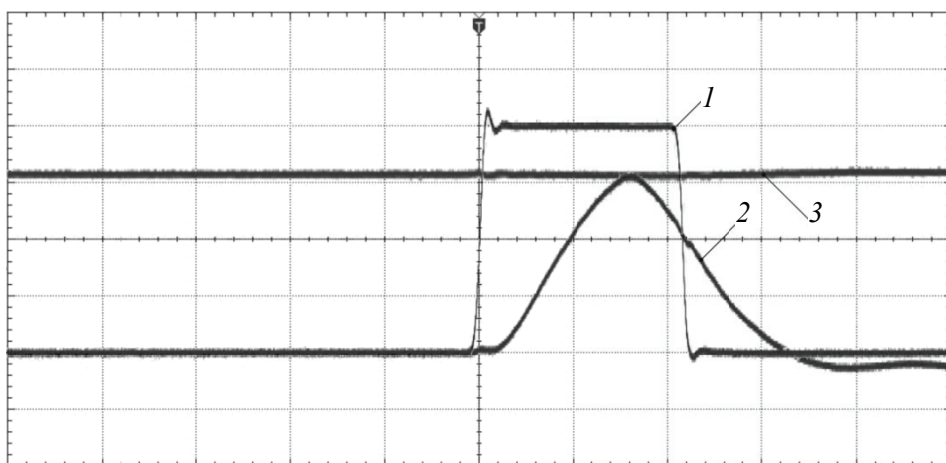


Рис. 4. Осциллограмма преобразования сигнала:
1 – сигнал возбуждения; 2 – выходной сигнал ФМЧС;
3 – низкочастотный сигнал на выходе амплитудного детектора

Анализ полученных результатов

Полученные экспериментальные данные функции преобразования ФМЧС после внедрения ККП, снятые при помощи датчика тока, изображены на рис. 5.

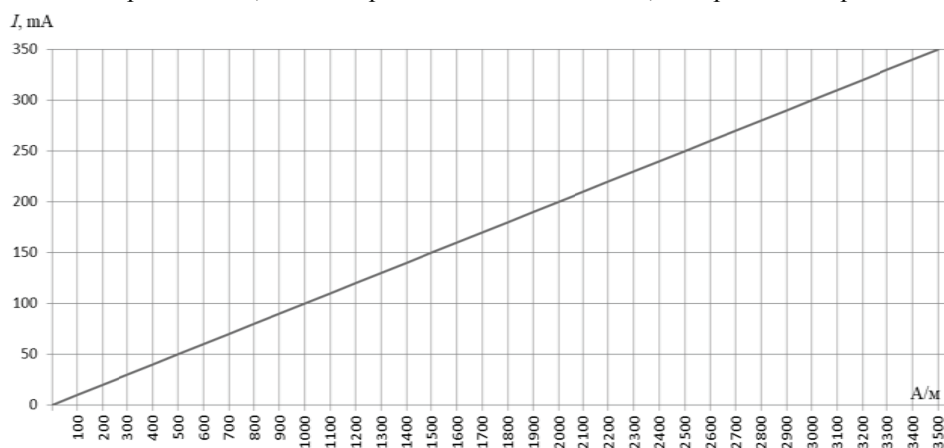


Рис. 5. Функция преобразования ФМЧС с ККП

Тепловой анализ показал, что саморазогрев ККП не превышал 10 °С при токе 0,1 А в течение 60 мин, а алгоритм цифровой компенсации дрейфа снизил дрейзг АЦП, ЦАП и датчика тока в 3 раза.

Чувствительность к слабым полям определяется шумами АЦП, ЦАП и датчиком тока. Применение сердечника из аморфного железа снижает шумы за счет высокой проницаемости и низкой коэрцитивной силы. Быстродействие системы лимитировано индуктивностью ККП, скоростью АЦП, ЦАП и датчиком тока.

Заключение

Предложенная компенсационная схема с фиксацией рабочей точки в центре линейного участка H_c радикально расширила динамический диапазон работы магнитометра на основе ферро модуляционного чувствительного сенсора. Экспериментально подтверждено, что магнитометр с катушкой компенсационного подмагничивания обеспечивает измерение полей в диапазоне ± 3500 А/м при нелинейности менее 2 %. Основное ограничение связано с максимальным током драйвера, определяющим верхнюю границу диапазона, а также температурным рассеиванием катушки компенсационного подмагничивания и внешним каркасом ферро модуляционного чувствительного сенсора. Ключевые преимущества заключаются в простой системе обработки, устойчивости к механическим и температурным перегрузкам, а также возможности использования магнитометра для широкого диапазона измерений магнитных полей.

Список литературы

1. Developments in subsea power and telecommunication cables detection: Part 2 – Electromagnetic detection / T. Szyrowski, S. K. Sharma, R. Sutton, G. A. Kennedy // Underwater Technology. – 2013. – Vol. 31, No. 3. – P. 133–143. doi: 10.3723/ut.31.133
2. Ripka, P. Magnetic Sensors and Magnetometers / P. Ripka. – Boston, MA : Artech House, 2021. – 479 p.
3. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника / М. Л. Бараночников. – Москва : ДМКПресс, 2002. – Т. 2. – 691 с.
4. Magnetometric Localization and Measurement of Hidden AC Currents / V. Grim, J. Pek, P. Ripka and A. Chirtsov // 2019 IEEE SENSORS, Montreal, QC, Canada, 2019. – P. 1–4. doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956513
5. Баранова, В. Е. Измерение слабого магнитного поля на основе феррозондового датчика : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Баранова Виталия Евгеньевна. – Томск, 2015. – 18 с.
6. Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers / B. Ando, S. Baglio, A. R. Bulsara, V. Sacco // IEEE Sensors Journal. – 2005. – Vol. 5, No. 5. – P. 895–904. doi: 10.1109/JSEN.2005.853598
7. The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions / C. Moldovanu, P. Brauer, O. V. Nielsen, J. R. Petersen // Sensors and Actuators A: Physical. – 2000. – Vol. 81, No. 1-3. – P. 197–199. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00087-4
8. Муратов, Р. Ф. Обзор подкатегории датчиков на эффекте Холла: униполярный датчик на эффекте Холла / Р. Ф. Муратов // Технологическая кооперация науки и производства: новые идеи и перспективы развития : сборник статей Международной науч.-практ. Конф., Воронеж, 01 февраля 2021 года. – Уфа, 2021. – С. 28–29.

9. Афанасьев, Ю. В. Феррозондовые приборы / Ю. В. Афанасьев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
10. Матюк, В. Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 29–64.
11. Власкин, К. И. Разработка электромагнитных систем малогабаритных первичных преобразователей феррозондового типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Власкин Константин Игоревич. – Уфа, 2016. – 155 с.
12. Nishio, Y. The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite / Y. Nishio, F. Tohyama, N. Onishi // Measurement Science and Technology. – 2007. – Vol. 18, No. 8. – P. 2721–2730. doi: 10.1088/0957-0233/18/8/050
13. Разработка математической модели образования выходного сигнала феррозонда при однополярном импульсном возбуждении / В. С. Безкоровайный, Ю. В. Ливцов, В. В. Яковенко, Н. А. Шатова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 70. – С. 190–197. doi: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197
14. Мирошниченко, О. Н. Функция преобразования феррозонда с однополярным импульсным возбуждением / О. Н. Мирошниченко, А. А. Ивженко, В. В. Яковенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 9(51). – С. 51–55.

Extending the Range of Measured Magnetic Field Values with a Fluxgate under Unipolar Pulsed Excitation

© D. I. Ilyinsky¹, D. A. Gostishchev¹✉, V. S. Bezkorovayny^{1,2}

¹ Youth Research Laboratory “Progress”, gostdi@yandex.ru;

² Department of Electromechanics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk,
Lugansk People's Republic, Russian Federation

Keywords: magnetization coil; compensating feedback; magnetometer; magnetic field; fluxgate.

Abstract: A method for expanding the dynamic measurement range of ferromodulation sensors based on amorphous alloy cores using unipolar rectangular pulse excitation is presented. The key problem addressed in this study is the limited linearity range of traditional ferromodulation sensors, which leads to significant errors when measuring strong and weak magnetic fields. We propose a solution, which involves implementing an active compensation system with a compensating magnetization coil. The fundamental difference is that the resulting magnetic field on the core is maintained not at zero, but at a fixed point corresponding to the center of the conditionally linear portion of the ferromodulation sensor's transfer function. The technical implementation includes a microcontroller-based digital control loop that analyzes the error signal from the amplitude detector, converted by an analog-to-digital converter, and generates a control signal via a digital-to-analog converter. The system accuracy is ensured by precise current measurement by the sensor and a digital drift compensation algorithm.

References

1. Szyrowski T., Sharma S.K., Sutton R., Kennedy G.A. Developments in subsea power and telecommunication cables detection: Part 2 – Electromagnetic detection, *Underwater Technology*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 133-143. doi: 10.3723/ut.31.133
2. Ripka P. *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Boston, MA: Artech House, 2021, 479 p.
3. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagneto-electronics], Moscow: DMKPress, 2002, vol. 2, 691 p. (In Russ.)
4. Grim V., Pek J., Ripka P. and Chirtsov A. Magnetometric Localization and Measurement of Hidden AC Currents, *2019 IEEE SENSORS*, Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956513
5. Baranova V.Ye. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tomsk, 2015. 18 p. (In Russ.)
6. Ando B., Baglio S., Bulsara A.R., Sacco V. Residence Times Difference Fluxgate Magnetometers, *IEEE Sensors Journal*, 2005, vol. 5, no. 5, pp. 895-904. doi: 10.1109/JSEN.2005.853598
7. Moldovanu C., Brauer P., Nielsen O.V., Petersen J.R. The noise of the Vacquier type sensors referred to changes of the sensor geometrical dimensions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2000, vol. 81, no. 1-3, pp. 197-199. doi: 10.1016/S0924-4247(99)00087-4
8. Muratov R.F. *Tekhnologicheskaya kooperatsiya nauki i proizvodstva: novyye idei i perspektivy razvitiya: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Technological Cooperation of Science and Industry: New Ideas and Development Prospects: Collection of Articles from the International Scientific and Practical Conf.], Voronezh, February 1, 2021, Ufa, 2021, pp. 28-29. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Afanas'yev Yu.V. *Ferrozondovyye pribory* [Fluxgate Devices], Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 186 p. (In Russ.)
10. Matyuk V.F. [Magnetic Structuroscopy Devices Based on Local Unipolar Pulsed Magnetization], *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* [Non-Destructive Testing and Diagnostics], 2012, no. 2, pp. 29-64. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Vlaskin K.I. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Ufa, 2016, 155 p. (In Russ.)
12. Nishio Y., Tohyama F., Onishi N. The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite, *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, no. 8, pp. 2721-2730. doi: 10.1088/0957-0233/18/8/050
13. Bezkorovaynyy V.S., Livtsov Yu.V., Yakovenko V.V., Shatova N.A. [Development of a Mathematical Model for the Formation of a Fluxgate Output Signal with Unipolar Pulsed Excitation], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University], 2019, no. 70, pp. 190-197. doi: 10.21667/1995-4565-2019-70-190-197 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Miroshnichenko O.N., Ivzhenko A.A., Yakovenko V.V. [Conversion Function of a Fluxgate with Unipolar Pulsed Excitation], *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dal'ya* [Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk State University], 2021, no. 9(51), pp. 51-55. (In Russ., abstract in Eng.)

Erweiterung des Messbereichs magnetischer Felder mit einer Ferrosonde unter unipolarer Impulsanregung

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zur Erweiterung des dynamischen Messbereichs von Ferromodulationssensoren mit Kernen aus amorpher Legierung mittels unipolarer Rechteckimpulsanregung vorgestellt. Das zentrale Problem dieser

Studie ist der begrenzte Linearitätsbereich herkömmlicher Ferromodulationssensoren, der zu erheblichen Messfehlern bei starken und schwachen Magnetfeldern führt. Als Lösung ist ein aktives Kompensationssystem mit einer Kompensationsmagnetisierungsspule vorgeschlagen. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass das resultierende Magnetfeld am Kern nicht auf null, sondern auf einem festen Punkt gehalten wird, der dem Zentrum des bedingt linearen Bereichs der Übertragungsfunktion des Ferromodulationssensors entspricht. Die technische Umsetzung umfasst einen mikrocontrollerbasierten digitalen Regelkreis, der das vom Amplitudendetektor erzeugte und mittels eines Analog-Digital-Wandlers gewandelte Fehlersignal analysiert und über einen Digital-Analog-Wandler ein Steuersignal generiert. Die Genauigkeit des Systems wird durch präzise Strommessung des Sensors und einen digitalen Driftkompensationsalgorithmus gewährleistet.

Extension de la plage des mesure des champs magnétiques par le ferrozond dans une excitation pulsée unipolaire

Résumé: Est présentée une méthode pour étendre la plage dynamique des mesure des capteurs sensibles à la ferromodulation à base de cœur d'alliages amorphes utilisant l'excitation par impulsions droites unipolaires. Un problème clé à résoudre dans le travail est la zone de linéarité limitée des capteurs de ferromodulation traditionnels, ce qui entraîne des erreurs importantes dans la mesure des forces et des champs magnétiques faibles. La solution proposée consiste en mise en œuvre d'un système de compensation actif avec une bobine d'aimantation compensatoire, dont la principale différence est le maintien du champ magnétique résultant sur le noyau non pas à un niveau nul, mais à un point fixe correspondant au centre de la section conditionnellement linéaire de la fonction de pré-formation du capteur sensible à la ferromodulation. La mise en œuvre technique comprend un circuit de commande numérique basé sur un microcontrôleur qui analyse le signal de désalignement d'un détecteur d'amplitude pré-formé par un convertisseur analogique-numérique et forme un effet de commande via un convertisseur numérique-analogique. Il est à noter que la précision du système est assurée par une mesure de courant de précision par le capteur et un algorithme de compensation de dérive numérique.

Авторы: *Ильинский Дмитрий Игоревич* – младший научный сотрудник молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс»; *Гостищев Дмитрий Александрович* – лаборант молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс»; *Безкоровайный Владимир Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика», ведущий научный сотрудник молодежной научно-исследовательской лаборатории «Прогресс», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Луганская Народная Республика, Российская Федерация.