

УДК 620.179

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-72-79

Способ уменьшения амплитудной погрешности магнитного компаратора

Г. В. Ломаев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
К. А. Андрияшев, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Выходные сигналы датчиков при контроле ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена (метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров скачков намагниченности, возникающих в результате эффекта Баркгаузена) представляют собой поток импульсов ЭДС от скачков Баркгаузена. Он имеет статистический характер (так называемый магнитный шум). При большом их количестве за полуцикл перемагничивания осуществляют либо скользящее усреднение, либо за весь полуцикл.

В бистабильных ферромагнетиках флуктуации выходных сигналов датчика (а последние представляют два импульса разной полярности за цикл перемагничивания) не могут быть усреднены без потери информации, что снижает метрологические характеристики всего устройства. Флуктуируют такие параметры, как амплитуда, длительность, поле старта. Это ограничивает применение его в точных измерениях.

Для разработки способа повышения стабильности выходного сигнала датчика использована гипотеза о полном переключении объема бистабильного образца ферромагнитного материала при скачке Баркгаузена. Гипотеза основана на новых физических данных, полученных при исследовании бистабильных ферромагнетиков авторами С. А. Барановым, Г. В. Ломаевым, С. П. Ахизиной, Г. В. Каримовой и другими.

Предложен способ уменьшения флуктуаций амплитуды импульса ЭДС на выходе магнитного компаратора, заключающийся в преобразовании вольт-секундной площади в импульс, пропорциональный амплитуде. Разработана простая и надежная схема, реализующая данный способ. Проведена серия экспериментов. Показано, что флуктуация выходного сигнала уменьшается при использовании разработанного способа почти на порядок.

Апробация способа осуществлялась на сердечниках из сплава викаллой 2 ($Co_{52}Fe_{38}V_{10}$), подвергнутых крутильной деформации до предела текучести по технологии, разработанной на кафедре «Приборы и методы измерения, контроля и диагностики» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

Ключевые слова: скачки Баркгаузена, бистабильные ферромагнетики, флуктуации процесса перемагничивания, магнитный компаратор.

Введение

Выходной сигнал датчика при контроле ферромагнитных материалов методом эффекта Баркгаузена (метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров скачков намагниченности, возникающих в результате эффекта Баркгаузена [1]), представляет собой поток импульсов ЭДС от скачков Баркгаузена. Он имеет статистический характер (так называемый магнитный шум). Количество скачков Баркгаузена за полуцикл перемагничивания в зависимости от свойств ферромагнитного материала и объема образца колеблется от сотен до миллионов скачков. Для нивелирования флуктуационной составляющей выходной сигнал подвергают либо текущему усреднению, либо за весь полуцикл перемагничивания.

Эволюционное развитие теории эффекта Баркгаузена повлекло за собой практическое создание магнитных материалов с различным числом скачков Баркгаузена (СБ): от 10^6 СБ/мм³ до двух – четырех СБ за цикл перемагничивания (в объеме 0,01 мм³ и более). Ферромагнетики с двумя СБ называются бистабильными, так как имеют два устойчивых состояния намагниченности

и используются при конструировании приборов для измерения магнитного поля [2–10].

На кафедре «Приборы и методы измерения, контроля, диагностики» ИжГТУ имени М. Т. Калашникова созданы бистабильные сердечники для БИСЕР-1, БИСЕР-2 и БИСЕР-3, параметры которых приведены в табл. 1 [11].

Таблица 1. Характеристики бистабильных сердечников

Характеристика сердечника	БИСЕР-1	БИСЕР-2	БИСЕР-3
Поле старта H_s , А/см	240...320	1,2...1,8	1,5...10
Амплитуда ЭДС, мВ/виток	2,5–3	2	1,5–2
Время переключения $\tau_{СБ}$, мкс	30–60	60	10–20
Минимальные размеры, мм	Ø 0,3×10	1×2×120	Ø 0,04×1
Материал	Викаллой 2	Аморфная лента	Аморфный микропровод

Флуктуации выходных сигналов датчика (а последние представляют два импульса разной полярности за цикл перемагничивания) снижают

метрологические характеристики всего устройства. Флуктуируют такие параметры, как амплитуда, длительность, поле старта. Это ограничивает применение его в точных измерениях.

Цель данной работы – разработка способа повышения стабильности выходного сигнала датчика.

Нами использована гипотеза о полном переключении бистабильного образца ферромагнитного материала при скачке Баркгаузена.

Предложен способ уменьшения флуктуаций амплитуды импульса ЭДС на выходе магнитного компаратора, заключающийся в преобразовании вольт-секундной площади в импульс, пропорциональный амплитуде. Разработана схема, реализующая способ. Проведена серия экспериментов. Показано, что флуктуация выходного сигнала уменьшается при использовании разработанного способа почти на порядок.

Обоснование способа

Для физического обоснования способа уменьшения флуктуаций амплитуды углубимся в процесс переключения ферромагнетика.

В ранних исследованиях эффекта Баркгаузена ставилась задача определения объема СБ ΔV . Если ось измерительной катушки (ИК) и вектор

намагниченности M параллельны, что справедливо для протяженного бистабильного сердечника и с плотно намотанной на него ИК, потокосцепление максимально (коэффициент связи равен единице). В первом приближении можно считать амплитуду импульса пропорциональной изменению магнитного момента ΔM . По амплитудам импульсов на выходе ИК можно оценивать размеры СБ.

В бистабильных ферромагнетиках не стоит задача определения объема СБ, так как весь ферромагнетик перемагничивается полностью до состояния насыщения. Однако скорость перемагничивания зависит от механизма образования доменной стенки, ее конфигурации. В работе [12] описаны два типа доменных стенок, скорость движения и динамика их распространения вдоль протяженного ферромагнетика принципиально отличаются. Там же дано физическое объяснение этого явления. Следовательно, амплитуда и форма импульса ЭДС на выходе ИК будет отражать механизмы перемагничивания.

На рис. 1 приведены типичные формы импульса ЭДС на выходе ИК для сердечников из проволоки сплава $Co_{52}Fe_{38}V_{10}$ (а, б) и аморфного микропровода из сплава $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$ (в, г).

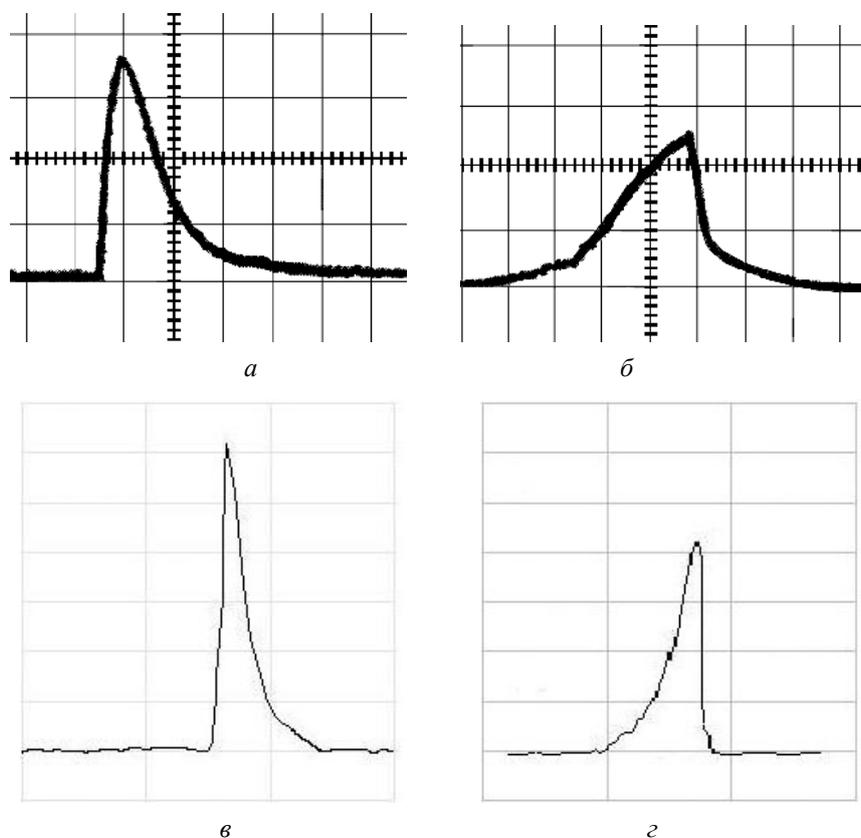


Рис. 1. Формы импульсов ЭДС для сердечника БИСЕР-1 из сплава $Co_{52}Fe_{38}V_{10}$ (викаллой): а – релаксационная, б – акселерационная (масштаб: по вертикали 1 дел. – 0,2 В, по горизонтали 1 дел. – 10 мкс для сердечника БИСЕР-3 из сплава $Fe_{81,6}Mn_{9,3}B_{1,8}Si_6C_{1,3}$); в – релаксационная, г – акселерационная (масштаб: по вертикали 1 дел. – 2,5 мВ, по горизонтали 1 дел. – 40 мкс)

Параметры импульсов для аморфного микропровода, изображенных на рис. 1 (в, г), сведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики импульсов ЭДС на выходе ИК

Форма импульса	Амплитуда, мВ	Длительность, мкс	Поле старта, А/м	Флуктуации, поля старта, %
Релаксационная	14,5	27	90	2,5–3 %
Акселерационная	10,8	33	191	0,8–1,5 %

Поле старта акселерационных импульсов по сравнению с релаксационными в 2 раза больше, они более стабильны и меньше по амплитуде. Их амплитуда зависит от скорости перемагничивания. Использование МК с подобными выходными сигналами приводит к появлению погрешностей при измерении магнитных величин. В кодовых карточках для депозитариев это было причиной сбоя кодов. Скорость перемещения кодовой карточки варьируется в большом диапазоне, что приводит к дополнительным погрешностям.

Сущность способа

Для разработки способа уменьшения флуктуации амплитуд нами использовалась рабочая гипотеза, которая состояла в предположении, что вольт-секундная площадь импульсов является константой и не зависит от механизма переключения сердечника.

Легко показать, что изменение магнитного потока через катушку $\Delta\Phi$, соответствующее скачку перемагничивания, в свою очередь про-

порционально изменению магнитного момента при этом скачка ΔM , т. е. размеру скачка, следовательно,

$$\Delta M \sim \int_0^{\tau} \varepsilon dt, \quad (1)$$

где τ – длительность СБ, ε – ЭДС, наводимая в ИК.

Отсюда следует, что площади импульсов ЭДС с ИК пропорциональны размерам СБ.

Для МК $\Delta M = 2M_{\text{насыщ}} = \text{const}$. Таким образом, формула (1) примет вид

$$M_{\text{насыщ}} = k \int_0^{\tau} \varepsilon dt = \text{const}. \quad (2)$$

Инженерная задача сводится к преобразованию вольт-секундной площади (2) в импульс напряжения пропорциональной амплитуды. В результате такого преобразования выходной сигнал МК становится постоянной амплитуды, заданной длительностью при любых режимах перемагничивания сердечника МК.

Реализация гипотезы базируется на следующей процедуре. Импульс ЭДС с ИК подается на электронный интегратор. После окончания импульса, длительность которого равна $\tau_{\text{СБ}}$, выходное напряжение интегратора достигает величины, пропорциональной вольт-секундной площади, и с помощью временного стробирования формируется в импульс постоянной амплитуды и длительности.

Схема преобразования вольт-секундной площади

Структурная схема исследовательской установки представлена на рис. 2.

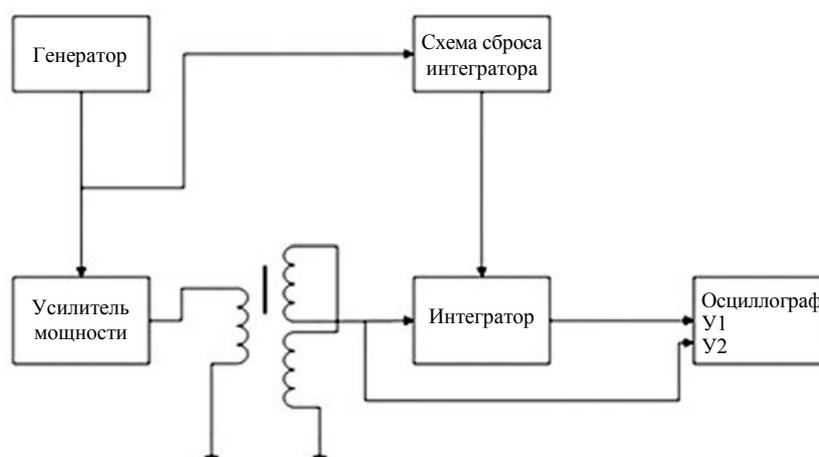


Рис. 2. Структурная схема исследовательской установки

Сердечник БИСЕР-1 помещался вовнутрь намагничивающего соленоида. При изменении магнитного поля соленоида происходят скачки Баркгаузена и в измерительной катушке (ИК) возникают импульсы ЭДС, которые подаются на вход усилителя, на выходе усилителя подключен электронный осциллограф для визуального наблюдения за процессом. Установка предназначена для исследования амплитуды и

площади импульсов перемагничивания бистабильного сердечника БИСЕР-3. Установка позволяет визуально наблюдать и измерять на экране двухлучевого запоминающего осциллографа как сам импульс перемагничивания, так и сигнал, пропорциональный площади этого импульса.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

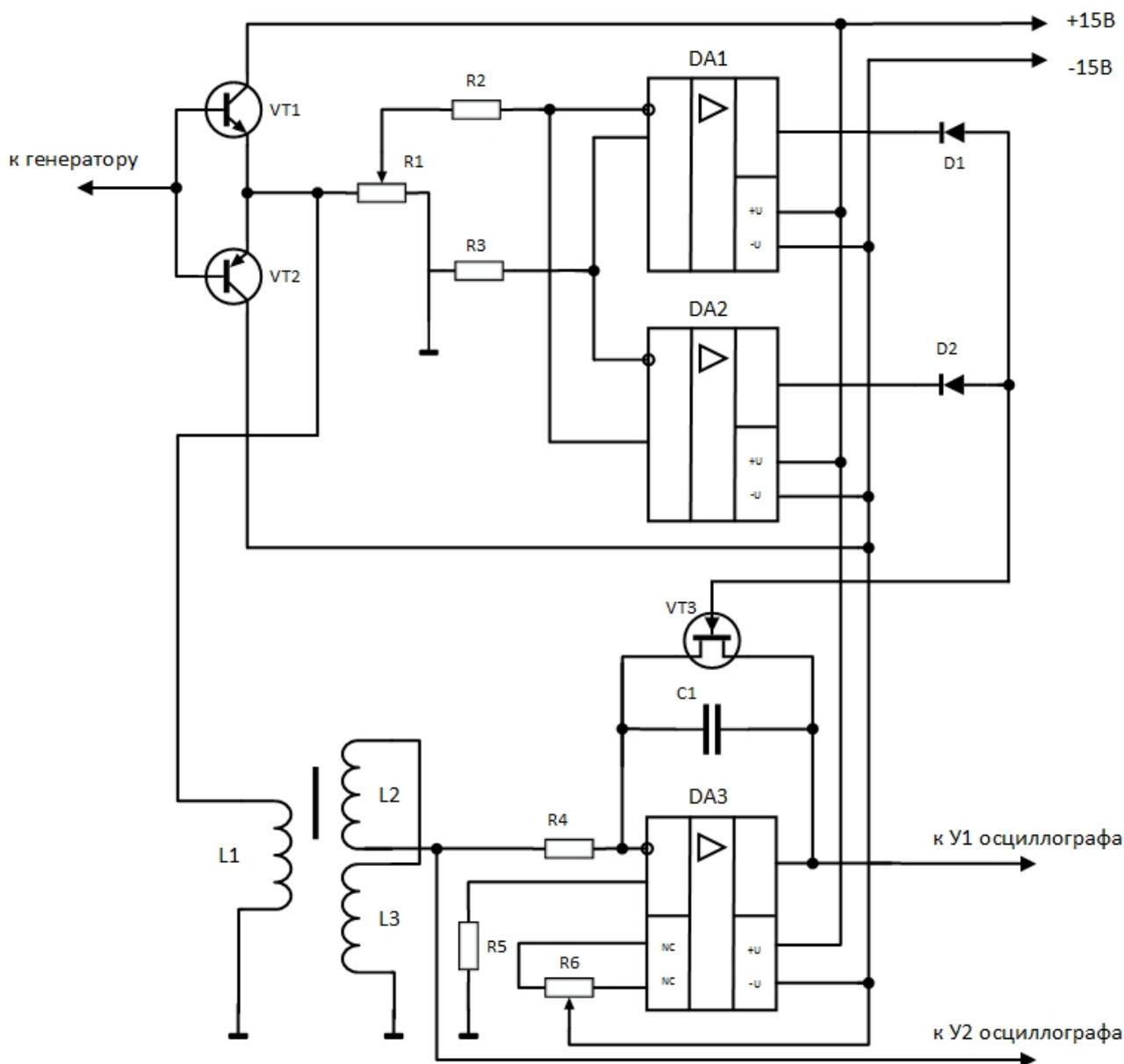


Рис. 3. Электрическая схема установки

Усиленное по мощности двухтактным эмиттерным повторителем, выполненным на комплементарной паре биполярных транзисторов VT1 и VT2, пилообразное напряжение генератора частотой 100 Гц поступает на перемагничивающую катушку L1. Величина магнитного поля, достаточная для перемагничивания сер-

дечника БИСЕР-1, устанавливается путем изменения выходного напряжения генератора. Перемагничивание (а по существу – переключение) бистабильных сердечников индуцируют в измерительной катушке L2 и L3 импульсы ЭДС.

Применение двух встречно включенных катушек L2 и L3 исключает погрешность от

трансформаторного эффекта. Импульсы ЭДС СБ поступают на вход У2 осциллографа и на вход интегратора. Интегратор выполнен на операционном усилителе DA3 с большим коэффициентом усиления, что позволяет получить высокую точность интегрирования импульсов.

Схема сброса интегратора работает таким образом, что при переходе выходного напряжения генератора через порог, задаваемый резистором R1, происходит переключение компараторов DA1 и DA2. В результате этого в точке соединения анодов диодов VD1 и VD2 образуются импульсы отрицательной полярности, которые подаются на затвор полевого транзистора VT3. Полевой транзистор, периодически открываясь, шунтирует конденсатор C3, устанавливая $U_{\text{вых}} = 0$.

Напряжение с выхода интегратора, пропорциональное площади импульсов ЭДС, поступает на вход У1 осциллографа.

Погрешность интегратора определяется операционным усилителем DA3 и постоянной времени интегрирования $\tau = R_4 C_3$ ($\tau > \tau_{\text{СБ}}$).

При использовании в интеграторе операционного усилителя К544УД2 и при времени интегрирования $\tau = 100$ мкс относительная погрешность интегрирования в диапазоне при длительности импульса ЭДС 20 мкс не превышает 0,5 %, что вполне удовлетворительно.

Результаты измерений

Всего измерениям были подвергнуты десять бистабильных сердечников БИСЕР-1. Статистическая выборка состояла из пятидесяти измерений для каждого сердечника (то есть сердечник перемагничивался 50 циклов). Результаты измерений представлены в виде графиков, приведенных на рис. 4–7. На рис. 4 представлен график флуктуаций амплитуды с ИК до использования способа уменьшения погрешности от флуктуаций, а на рис. 5 – гистограмма получения после обработки информации, представленной на рис. 4.

Гистограмма распределения амплитуд импульсов ЭДС на выходе ИК представлена на рис. 5.



Рис. 4. Флуктуации амплитуды импульсов ЭДС на входе ИК БИСЕР-1 от цикла к циклу 50 циклов перемагничивания

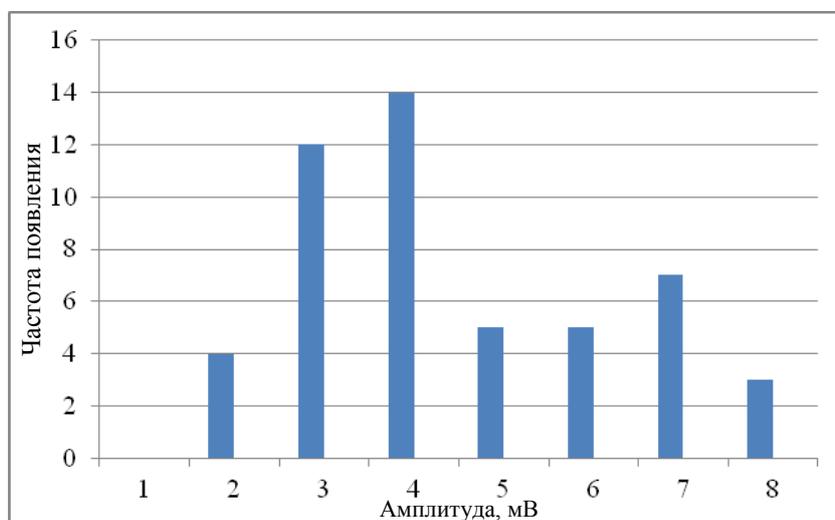


Рис. 5. Гистограмма распределения амплитуд импульсов ЭДС на выходе ИК

После статистической обработки измерений среднее арифметическое амплитуды составило 4,884 мВ, а среднее квадратическое – 0,88 мВ. Относительная величина флуктуации амплитуды выходного сигнала с ИК составила 18 %.

После применения предложенного авторами способа преобразования вольт-секундной площади в пропорциональную амплитуду (рис. 2)

флуктуации выходного сигнала значительно уменьшились. Изменения амплитуды импульсов на выходе преобразователя «площадь-импульс» приведены на рис. 6, а гистограмма – на рис. 7.

На рис. 7 представлена гистограмма распределения амплитуд импульсов на выходе интегратора.

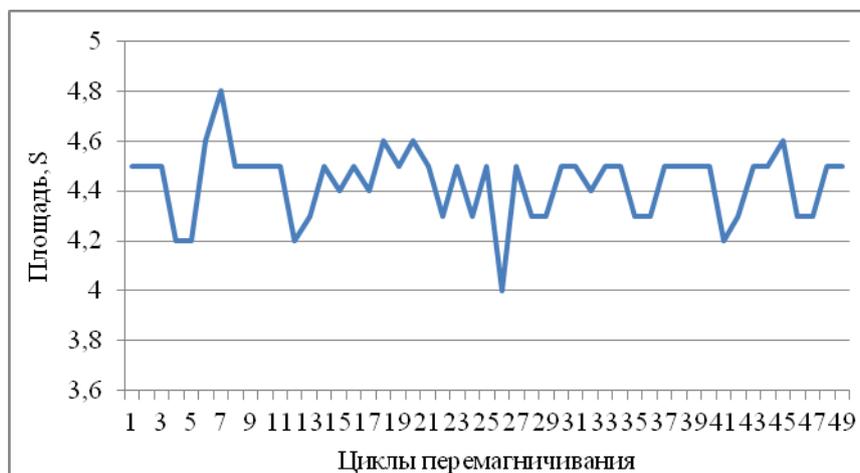


Рис. 6. Изменение амплитуды импульсов на выходе интегратора (преобразователя «площадь-импульс») за 50 циклов перемagnetизации

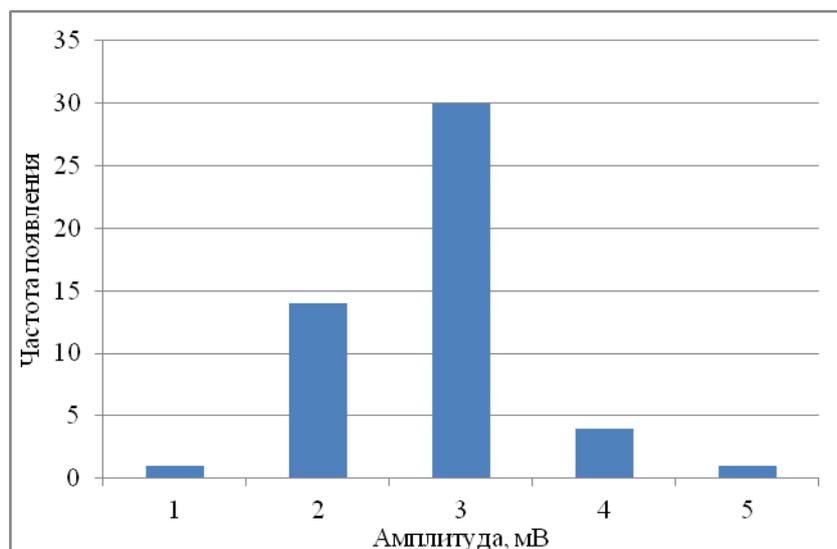


Рис. 7. Гистограмма распределения амплитуд импульсов на выходе интегратора (преобразователя «площадь-импульс»)

Из приведенных данных измерений (рис. 6 и 7) среднее арифметическое амплитуды импульсов напряжения на выходе интегратора составило 4,434 мВ, а среднее квадратическое – 0,144 мВ. Относительная случайная погрешность – 3 %.

Таким образом, с помощью разработанного способа уменьшения амплитудной погрешности магнитного компаратора флуктуации выходного сигнала МК с преобразователем вольт-секундной площади уменьшились в 6 раз (18 %: 3 %)!

Вывод

Предложенный способ уменьшения амплитудной погрешности магнитного компаратора, основанной на преобразовании вольт-секундной площади импульсов ЭДС на выходе измерительной катушки МК при тщательной схемотехнической его проработке, позволит уменьшить разброс амплитуды выходного импульса МК почти на порядок.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 56542–2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.10.2019 г. №1071-ст: дата введения 2020-11-01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200169346> (дата обращения: 28.01.2021).
2. Ломаев Г. В., Ахизина С. П., Водеников С. К. О двух формах импульса ЭДС от скачка намагниченности в ферромагнетике // Дефектоскопия. 1996. № 12. С. 54–59.
3. Баранов С. А. О возможности применения аморфных микро- и нанопроводов с эффектом Баркгаузена // Электронная обработка материалов. 2013. Т. 49, № 6. С. 64–70.
4. Баранов С. А. Моделирование перемагничивания аморфного микро- и нанопровода // Электронная обработка материалов. 2014. Т. 50, № 6. С. 51–61.
5. Баранов С. А. Зависимость магнитных свойств микро- и нанопроводов от тензо- и термомагнитной обработки // Электронная обработка материалов. 2017. Т. 53, № 1. С. 78–89.
6. Иванов А. А., Орлов В. А. Сценарии перемагничивания тонких нанопроволок // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, вып. 11. С. 2143–2150.
7. Феноменология петель магнитного гистерезиса в многослойных микропроводах α -Fe/DyPrFeCoB / Р. Б. Моргунов, О. В. Коплак, А. Д. Таланцев, Д. В. Королев, В. П. Пискорский, Р. А. Валеев // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). С. 67–75.
8. Генерация электромагнитных импульсов при циклическом перемагничивании деформированных ферромагнитных сплавов / Н. А. Азаренко, А. И. Великодний, В. Г. Кириченко, Т. А. Коваленко, М. Г. Компаниец, С. Ю. Кочетова // Вестник Харьковского университета. 2008. № 832, вып. 4. С. 41–53.
9. Ветошко П. М. Перемагничивание однородным вращением феррит-гранатовых пленок в чувствительных элементах магнитных сенсоров : дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 134 с.
10. Kimball D. Precessing Ferromagnetic Needle Magnetometer / D. Kimball, A. Sushkov, D. Budker // Phys. Rev. Lett. –2016. Vol. 116. P. 190801.
11. Ломаев Г. В., Каримова Г. В. Датчики Баркгаузена : монография. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2008. 368 с.
12. Иванов А. А., Орлов В. А. Сценарии перемагничивания тонких нанопроволок // Физика твердого тела. 2015. Т. 57, вып. 11. С. 2143–2150.

References

1. GOST R 56542–2019. Kontrol' nerazrushayushchii. Klassifikatsiya vidov i metodov: utverzhden i vveden v deistvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 30.10.2019 g. №1071-st: data vvedeniya 2020-11-01 [GOST R 56542–2019. Non-destructive testing. Classification of types and methods: approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated October 30, 2019 No. 1071-st: date of introduction 2020-11-01]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200169346> (accessed 28.01.2021) (in Russ.).
2. Lomaev G.V., Akhizina S.P., Vodenikov S.K. [On two forms of an EMF pulse from a jump in magnetization in a ferromagnet]. *Defektoskopiya*. 1996. No. 12. Pp. 54-59 (in Russ.).
3. Baranov S.A. [On the possibility of using amorphous micro- and nanowires with the Barkhausen effect]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2013. Vol. 49, no. 6. Pp. 64-70 (in Russ.).
4. Baranov S.A. [Modeling the magnetization reversal of an amorphous micro- and nanowire]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2014. Vol. 50, no. 6. Pp. 51-61 (in Russ.).
5. Baranov S.A. [Dependence of the magnetic properties of micro- and nanowires on tenso- and thermo-magnetic treatment]. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2017. Vol. 53, no. 1. Pp. 78-89 (in Russ.).
6. Ivanov A.A., Orlov V.A. [Scenarios of magnetization reversal of thin nanowires]. *Fizika tverdogo tela*. 2015. Vol. 57, release 11. Pp. 2143-2150 (in Russ.).
7. Morgunov R.B., Koplak O.V., Talantsev A.D., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A. [Phenomenology of magnetic hysteresis loops in multilayer α -Fe / DyPrFeCoB microwires]. *Trudy VIAM*. 2019. No. 7. Pp. 67-75 (in Russ.).
8. Azarenko N.A., Velikodnyi A.I., Kirichenko V.G., Kovalenko T.A., Kompaniets M.G., Kochetova S.Yu. [Generation of electromagnetic pulses during cyclic magnetization reversal of deformed ferromagnetic alloys]. *Vestnik Khar'kovskogo universiteta*. 2008. Vol. 4, no. 832. Pp. 41-53 (in Russ.).
9. Vetoshko P.M. *Peremagnichivanie odnorodnym vrashcheniem ferrit-granatovykh plenok v chuvstvitel'nykh elementakh magnitnykh sensorov* [Magnetization reversal by uniform rotation of garnet-ferrite films in sensitive elements of magnetic sensors]. PhD thesis. Moscow, 2017. 134 p. (in Russ.).
10. Kimball D. Precessing Ferromagnetic Needle Magnetometer / D. Kimball, A. Sushkov, D. Budker. *Phys. Rev. Lett*. 2016. Vol. 116. P. 190801.
11. Lomaev G.V., Karimova G.V. *Datchiki Barkgauzена* [Barkhausen sensors]. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2008. 368 p. (in Russ.).
12. Ivanov A.A., Orlov V.A. [Scenarios of magnetization reversal of thin nanowires]. *Fizika tverdogo tela*. 2015. Vol. 57, release 11. Pp. 2143-2150 (in Russ.).

Method for Reducing the Amplitude Error of the Magnetic Comparator

G. V. Lomaev, DS in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. A. Andryushaev, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The output signals of sensors when testing ferromagnetic materials using the Barkhausen effect method (a non-destructive testing method based on recording the parameters of magnetization jumps arising from the Barkhausen effect) represent a stream of EMF pulses from Barkhausen jumps. It is of a statistical nature (the so-called "magnetic noise"). With a large number of them, the moving average process takes place during the half-cycle of magnetization reversal.

In bistable ferromagnets, fluctuations of the sensor output signals (and the latter represent two pulses of different polarity per magnetization reversal cycle) cannot be averaged without loss of information, which reduces the metrological characteristics of the entire device. Such parameters as amplitude, duration, and start field fluctuate. This limits its use in precise measurements.

To develop a method for increasing the stability of the sensor output signal, the hypothesis of complete switching of a bistable sample of a ferromagnetic material with a Barkhausen jump was used. The hypothesis is based on new physical data obtained in the study of bistable ferromagnets by the authors Baranov S. A., Lomaev G. V., Akhizina S. P. and others.

A method is proposed to reduce fluctuations in the amplitude of the EMF pulse at the output of the magnetic comparator, which consists in converting the volt-second area into a pulse proportional to the amplitude. A simple and reliable circuit has been developed that implements this method. A series of experiments was carried out. It is shown that the fluctuation of the output signal decreases by almost an order of magnitude when using the developed method.

The approbation of the method was carried out on cores made of vikalloy 2 (Co52Fe38V10) alloy subjected to plastic deformation to form plasticity according to the technology developed at the Department of instruments and methods of measurement, control and diagnostics of Kalashnikov ISTU.

Keywords: Barkhausen jump, bistable ferromagnets, fluctuations in the process of magnetization, magnetic comparator.

Получено: 11.02.2021