

**Received:** 02.10.2024

**Revised:** 31.10.2024

**Accepted:** 22.11.2024

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2024.6.107-118

## MAGNETIC NOISES OF MICROCHIP-TYPE HALL TRANSDUCERS

Yu. Ya. Reutov

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Email: [asija1@yandex.ru](mailto:asija1@yandex.ru)

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia

Tel.: +7 (343) 378-3674

There is a need to use Hall microchip transducers in non-destructive eddy current testing instead of induction coils, traditionally used to convert the parameters of an alternating magnetic field into an electric signal. The advantage of microchip sensors, along with their manufacturability and low cost, is the low dependence of their efficiency on the frequency of the perceived alternating field (especially in the low-frequency region). At low operating frequencies, the signal voltage induced in the receiving coils of an eddy current flaw detector becomes comparable with the intrinsic noise of its receiving path, and to isolate this signal reliably, it is necessary to increase the number of turns of the receiving coil, which is not always acceptable due to strict requirements for its dimensions. This advantage of Hall transducers (sensors) opens up prospects for a significant expansion of the scope of application of non-destructive eddy current testing. An obstacle to this could be the relatively high intrinsic noise of such sensors, observed at zero operating frequencies and amounting to several (and sometimes dozens of) microteslas (in units of magnetic induction).

This paper presents the results of measuring the noise characteristics of promising 1SA-1M microchip-type Hall magnetic field sensors manufactured by Sentron. It has been found that, at frequencies from 20 Hz to 10 kHz, the intrinsic noises of the examined sensors are tens of times less than those observed at zero frequency. Their amplitude does not exceed tenths of a microtesla (in units of the induction of the measured alternating magnetic field), and this opens up possibilities for using these sensors in eddy current flaw detectors with low (tens of hertz) operating frequencies instead of induction coils. This can expand the application of non-destructive eddy current testing. The obtained information can also be useful in developing means for measuring alternating magnetic fields, regardless of eddy current flaw detection.

**Keywords:** eddy current testing, magnetic field sensor, Hall transducer, peak-to-peak noise, alternating field, signal, induction coil

### Acknowledgment

*The study was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education, theme Diagnostics, No. 122021000030-1.*

### References

1. Antonov, V.G., Petrov, L.M., and Shchelkin, A.P. *Sredstva izmereniya magnitnykh parametrov materialov* [Apparatus for Measuring Magnetic Parameters of Materials]. Energoatomizdat Publ., Leningrad, 1986, 216 p. (In Russian).

2. Rodigin, N.M. and Korobeinikova, I.E. *Kontrol kachestva izdeliy metodom vikhrevykh tokov* [Production Quality Control by Means of the Eddy-Current Method]. Mashgiz Publ., Moscow–Sverdlovsk, 1958, 64 p. (In Russian).
3. Lu, C.-C., Huang, J., Chiu, P.-K., Chiu, S.-L., and Jeng, J.-T. High-sensitivity low-noise miniature fluxgate magnetometers using a flip chip conceptual design. *Sensors*, 2014, 14 (8), 13815–13829. DOI: 10.3390/s140813815.
4. Baranochnikov, M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagneto-electronics, vol. 1]. DMK Press Publ., Moscow, 2001, 544 p. (In Russian).
5. Patramanskii, B.V. *Razrabotka, sozдание, i ekspluatatsiya sredstv magnitnogo kontrolya sostoyaniya trub magistralnykh gazoprovodov* [Development, Design, and Exploitation of the Magnetic Testing Equipment for Inspection of Tubes of Gas Main Pipelines]. Bank Kulturnoy Informatsii Publ., Ekaterinburg, 2006, 240 p. (In Russian).
6. Panchishin, Yu.M. and Usatenko, S.T. *Izmerenie peremennykh magnitnykh poley* [Measurement of Alternating Magnetic Fields]. Tekhnika Publ., Kyiv, 1973, 140 p. (In Russian).
7. Abramzon, G.V. and Oboishev, Yu.P. *Induktsionnye izmeritelnye preobrazovateli peremennykh magnitnykh poley* [Inductive Measuring Transducers for Alternating Magnetic Fields]. Energoatomizdat Publ., Leningrad, 1984, 117 p. (In Russian).
8. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., and Vázquez-Sánchez, E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 2011, 11 (3), 2525–2565. DOI: 10.3390/s110302525.
9. Reutov Yu.Ya. Features of magnetization of a ferromagnet by an alternating field. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 6, 35–47. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2020-6/2020-6\\_313.html](http://dream-journal.org/issues/2020-6/2020-6_313.html)
10. Reutov, Yu.Ya., Shcherbinin, V.E., and Volkov, A.V. Possibilities for the selection of magnetic field transducers for nondestructive testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, 50, 760–768. DOI: 10.1134/S1061830914120080.
11. Drozhzhina, V.I., Reutov, Yu.Ya., and Yanus, R.I. Magnetic noise in circular magnetic modulators. In: *Sbornik trudov IFM AN SSSR* [Collection of Publications of Institute of Metal Physics of Academy of Sciences of USSR]. Sverdlovsk, 1967, iss. 26, pp. 82–85. (In Russian).
12. Hooge, F.N.  $1/f$  noise is no surface effect. *Physics Letters A*, 1969, 29 (3), 139–140. DOI: 10.1016/0375-9601(69)90076-0.
13. Berntgen, J., Heime, K., Daumann, W., Auer, U., Tegude, F.-J., and Matulionis, A. The  $1/f$  noise of InP based 2DEG devices and its dependence on mobility. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, 46 (1), 194–203. DOI: 10.1109/16.737459.
14. Tacano, M. Hooge fluctuation parameter of semiconductor microstructures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, 40 (11), 2060–2064. DOI: 10.1109/16.239749.
15. Mouetsi, S., El Hdiy, A., and Bouchemat, M. The  $1/f$  noise in a two-dimensional electron gas: temperature and electric field considerations. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 2015, 92 (4), 3–6.
16. Sysoeva, S. Magnetic field sensors. *Komponenty i Tekhnologii*, 2012, 1, 19–32. (In Russian).
17. Popovic, R.S. High resolution Hall magnetic sensors. In: *2014 29th International Conference on Microelectronics Proceedings – MIEL 2014*, Belgrade, Serbia, 2014, pp. 69–74. DOI: 10.1109/MIEL.2014.6842087.
18. Reutov, Yu.Ya. Some aspect of using a magnetoresistive transducer. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2001, 37, 859–863. DOI: 10.1023/A:1016817517351.
19. Touil, D.R., Lahrech, A.C., Helifa, B., and Lefkaier, I.K. Simulation and Implementation of a high sensitive differential eddy current giant magnetoresistance probe for non-destructive testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58, 833–846. DOI: 10.1134/S1061830922090029.
20. Kogan, L.K., Stashkov, A.N., and Nichipuruk, A.P. Quality control of soldering of side walls of clamps in current-carrying connections of electric machines taking into account the influence of their sizes. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58, 1142–1152. DOI: 10.1134/S1061830922700140.

21. Kogan, L.Kh. and Stashkov, A.N. Capabilities of eddy current NDT of soldered current-carrying joints in submersible electrical equipment for oil and gas industry. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2023, 4, 47–59. DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059. Available at: [http://dream-journal.org/issues/2023-4/2023-4\\_403.html](http://dream-journal.org/issues/2023-4/2023-4_403.html)
22. Tong, P., Wu, L., Yanchen, A., Su, R., and Wu, Y. A novel eddy current sensor for displacement measurement with high accuracy and long range. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23 (11), 12066–12075. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3266564.
23. Zagidulin, R.V. and Bakiev, A.T. Determination of the parameters of stress-corrosion cracks of the main gas pipeline based on the results of eddy current control. *Kontrol. Diagnostika*, 2023, 12, 24–34. (In Russian). DOI: 10.14489/td.2023.12.pp.024-034.
24. Atavin, V.G., Smirnov, Yu.G., Iskhuzhin, R.R., Zavyalov, Z.I., Uzkih, A.A., Yurchenko, O.S., and Klyuchnikova, M.A. Eddy current quality control of thin-walled refractory alloy pipes. *Kontrol. Diagnostika*, 2024, 4, 29–37. (In Russian). DOI: 10.14489/td.2024.04.pp.029-037.

Подана в журнал: 02.10.2024

УДК 620.179.14

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.107-118

## МАГНИТНЫЕ ШУМЫ МИКРОСХЕМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

Ю. Я. Реутов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0002-7847-6004>  [asijal@yandex.ru](mailto:asijal@yandex.ru)

Электронная почта: [asijal@yandex.ru](mailto:asijal@yandex.ru)

Адрес для переписки: ул. Софьи Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108, Россия

Tel.: +7 (343) 378-36-74

Существует потребность применения в неразрушающем вихретоковом контроле микросхемных преобразователей Холла вместо индукционных катушек, традиционно используемых для преобразования параметров переменного магнитного поля в электрический сигнал. Преимуществом микросхемных сенсоров, наряду с технологичностью и дешевизной, является малая зависимость их эффективности от частоты воспринимаемого переменного поля (особенно в области малых частот). При малых рабочих частотах напряжение сигнала, наводимое в приемных катушках вихретокового дефектоскопа, становится сравнимым с собственными шумами его приемного тракта, и для уверенного выделения этого сигнала приходится увеличивать число витков приемной катушки, что далеко не всегда приемлемо по причине жестких требований к ее габаритам. Такое преимущество преобразователей (сенсоров) Холла открывает перспективы существенного расширения области применения неразрушающего вихретокового контроля. Препятствием к этому могли бы явиться сравнительно большие собственные шумы таких сенсоров, наблюдаемые на нулевых рабочих частотах и составляющие несколько (а порой и десятки) микротесла (в единицах магнитной индукции).

В предлагаемом сообщении излагаются результаты измерения шумовых характеристик перспективных микросхемных холловских сенсоров магнитного поля марки 1SA-1M, производимых фирмой Sentron. Установлено, что собственные шумы обследованных сенсоров на частотах от 20 Гц до 10 кГц в десятки раз меньше наблюдаемых на нулевой частоте. Их размах не превышает десятых долей микротесла (в единицах индукции измеряемого переменного магнитного поля), что открывает возможности для применения указанных сенсоров в вихретоковых дефектоскопах с малыми (десятки герц) рабочими частотами вместо индукционных катушек. Результатом может явиться расширение области применения неразрушающего вихретокового контроля. Полученные сведения могут быть полезны и при разработке средств измерения переменных магнитных полей безотносительно к вихретоковой дефектоскопии.

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, сенсор магнитного поля, преобразователь Холла, размах шума, переменное поле, сигнал, индукционная катушка

### 1. Введение

Как известно [1], эффективность функционирования дефектоскопов, в которых используются изменения тех или иных параметров магнитного поля для выявления дефектов в объекте контроля, в значительной степени определяется качеством работы преобразователей этих параметров в электрический сигнал. На ранних стадиях развития дефектоскопии параметры постоянного магнитного поля определялись путем измерения ЭДС магнитной ин-

дукции, возникающей в замкнутом проводящем контуре (приемной катушке) при целенаправленных изменениях этих параметров в соответствии с известным соотношением

$$E \sim -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $E$  – амплитуда ЭДС, возникающей в проводящем контуре при изменении пронизывающей его магнитной индукции  $B$  за время  $t$ . Для этого индукция магнитного поля подвергалась целенаправленному кратковременному изменению (модуляции) путем изменения какого-либо параметра. Это могло быть прекращение протекания (или изменение полярности) постоянного тока через источник поля (соленоид, обмотка электромагнита), намагничивающего объект контроля, или удаление упомянутого проводящего контура или объекта контроля из зоны действия этого поля. Такая процедура обычно применялась в сочетании с использованием баллистического гальванометра.

В дефектоскопе для обследования магнитных характеристик объекта контроля использовалось гармоническое переменное магнитное поле частотой

$$E_m = A \cdot B_m \cdot n \cdot S \cdot f, \quad (2)$$

где  $E_m$  – амплитуда переменной ЭДС индукции;  $S$  – площадь потока индукции, охватываемая одним витком контура;  $n$  – число витков контура;  $f$  – частота этой ЭДС;  $A$  – некоторый коэффициент, зависящий от взаимного расположения компонентов дефектоскопа и контролируемого изделия.

Обследование характеристик объекта контроля в переменном магнитном поле (вихретоковый контроль) обладало неоспоримым преимуществом по сравнению с обследованием в постоянном поле, обусловленным отсутствием в те времена простых и доступных средств преобразования параметров постоянного (медленно меняющегося) магнитного поля в электрический сигнал. Существовавшие магнитомодуляционные преобразователи постоянного магнитного поля (феррозонды) были сложны в изготовлении, а классические преобразователи Холла обладали не всегда приемлемой чувствительностью [3].

Положение коренным образом изменилось с появлением широкодоступных микросхемных полупроводниковых преобразователей Холла (сенсоров) [4]. Обладая малыми габаритами, низкой стоимостью и простотой использования, эти изделия электронной промышленности получили широкое распространение в дефектоскопии, ориентированной на контроль свойств изделий в постоянном магнитном поле. Достаточно сказать, что известны конструкции дефектоскопов с использованием сотен микросхемных сенсоров постоянного магнитного поля в одном изделии [5].

К настоящему времени сложилась ситуация, когда реализация дефектоскопического контроля изделий в постоянном магнитном поле в достаточной степени обеспечена наличием доступных и технологичных микросхемных сенсоров постоянного магнитного поля, в то время как вихретоковый контроль в большей мере опирается на использование малотехнологичных и не слишком надежных сенсоров переменного магнитного поля – индукционных катушек [2, 6, 7, 20, 21, 23, 24].

В последнее время намечается тенденция к использованию микросхемных сенсоров постоянного магнитного поля и в вихретоковом контроле [8, 9, 19, 22]. Обусловлено это их способностью воспринимать и переменные магнитные поля в широком диапазоне частот. Ценным преимуществом таких сенсоров является постоянство их коэффициентов преобразования в диапазоне частот от нуля до десятков кГц, в то время как эффективность традиционных индукционных катушек пропорциональна частоте воспринимаемого магнитного поля [6], что ограничивает возможности вихретокового контроля при малых рабочих частотах.

Одной из причин ограниченного применения микросхемных преобразователей постоянного магнитного поля в вихретоковых дефектоскопах является, по мнению автора, предубеждение относительно их шумового порога чувствительности. По данным работы [10], шумовой порог чувствительности к постоянному магнитному полю составляет для таких сенсоров несколько (до десятков) микротесла, в то время как во многих случаях вихретокового контроля требуется измерять переменные магнитные поля, обладающие в десятки и сотни раз меньшей индукцией, что и обеспечивается пока традиционными индукционными преобразователями переменного магнитного поля [6, 7, 20, 21, 23, 24].

Между тем нельзя упускать из виду то обстоятельство, что собственные шумы самых различных преобразователей физических величин в электрический сигнал обладают [11–17] зависимостью интенсивности от частоты наблюдения (вблизи нулевой), характеризуемой выражением  $1/f$ , то есть интенсивность шумов с отдалением частоты наблюдения  $f$  от нулевой обычно гораздо меньше наблюдаемой при ее нулевом значении. Это явление впервые было обнаружено вскоре после изобретения электронных ламп и известно как «дробовой шум», или «фликкер-шум».

Данная закономерность позволяет предположить, что собственные шумы микросхемных сенсоров магнитного поля при использовании их для преобразования переменных полей могут оказаться настолько меньше наблюдаемых при измерении постоянных, что это позволит расширить область их применения, обеспечив конкуренцию индуктивным преобразователям.

Особый интерес здесь представляют малоизвестные преобразователи Холла 1SA-1M, выпускаемые фирмой Sentron [10]. Благодаря использованию в их конструкции пермаллоевых концентраторов измеряемого магнитного поля, их чувствительность на порядок выше широко распространенных микросхемных преобразователей Холла (например, SS495). Их шумовой порог чувствительности к постоянному полю составляет единицы микротесла, а при измерении переменных полей может оказаться еще ниже.

В связи с тем что по геометрическим размерам микросхемы 1SA-1M идеально подходили для решения конкретной производственной задачи, возникла необходимость исследовать частотную зависимость их магнитных шумов. Результаты этих исследований и представлены в данной статье.

## 2. Объекты исследования

Обследуемые сенсоры обладали габаритами  $6,2 \times 5 \times 1,7$  мм и позволяли измерять магнитные поля в диапазоне  $\pm 5$  миллитесла. При питании постоянным напряжением 5 В в отсутствие магнитного поля на выходе сенсора действует постоянное напряжение около 2,5 В (половина питающего напряжения). При действии вдоль плоскости микросхемы (параллельно сторонам с выводами) постоянного магнитного поля выходное напряжение сенсора изменяется в пределах приблизительно от 0 до 5 В, в зависимости от полярности и индукции приложенного поля. Крутизна преобразования сенсора составляет порядка 50 мВ/мТ. Конструкция сенсора позволяет программно однократно корректировать крутизну преобразования в ограниченных пределах.

В наших экспериментах сенсоры использовались в состоянии поставки. Измерения выполнялись на пяти экземплярах сенсоров из одной партии, выбранных по случайному закону.

## 3. Шумы при измерении постоянных полей

Для измерения собственных шумов сенсора при измерении постоянных полей он располагался внутри соленоида – источника магнитных полей – так, чтобы поле, создаваемое соленоидом, было ориентировано вдоль направления наибольшей чувствительности – вдоль плоскости корпуса микросхемы, параллельно ее сторонам с выводами. Для предотвращения

влияния посторонних магнитных полей (в том числе земного) соленоид с сенсором был помещен в трехслойный магнитный экран из отожженного пермаллоя марки 79НМ.

Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 1.

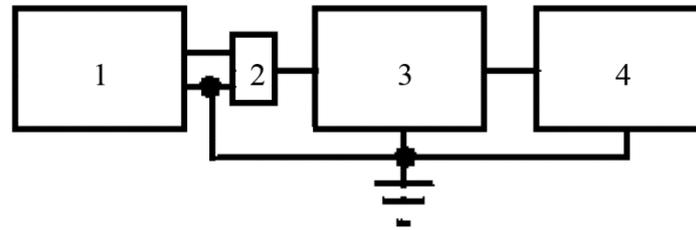


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки: 1 – стабилизированный источник постоянного напряжения; 2 – испытуемый сенсор; 3 – усилитель постоянного напряжения; 4 – цифровой запоминающий осциллограф

Напряжение питания 5 В со стабилизированного источника 1 типа ВИП-009 подавалось на соответствующие контакты испытуемого сенсора 2. Его выходное напряжение усиливалось в 100 раз малошумящим операционным усилителем (К140УД13) 3 и затем поступало на вход цифрового запоминающего осциллографа 4 типа LCRY2101C01495, выполнявшего функции самописца.

Постоянный ток выбранной силы и полярности пропускался через соленоид, вызывая появление на выходе испытуемого сенсора соответствующего сигнала [18], который в течение нескольких минут фиксировался самописцем. Пример записи сигнала на фоне сопровождающего его шума [11] представлен на рис. 2.

На этом рисунке зафиксированы размах сигнала от магнитного поля, создаваемого постоянным током через соленоид, и размах сопровождающего его шума (Noise), наблюдавшиеся в течение нескольких минут. Зная индукцию магнитного поля, действовавшего на сенсор, нетрудно вычислить размах шума на выходе сенсора в единицах индукции этого поля.

Следует заметить, что наблюдаемый шум обусловлен флуктуациями электрических процессов в кристалле преобразователя Холла и встроенного в микросхему операционного усилителя и не является в строгом смысле магнитным шумом. Но поскольку исследуемый сенсор выполняет функции преобразования в электрический сигнал именно магнитного поля, постольку вполне допустимо называть шум на его выходе магнитным и выражать в единицах индукции измеряемого магнитного поля.

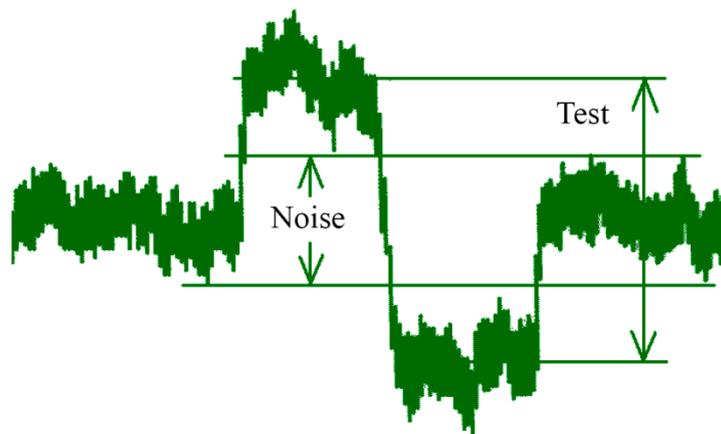


Рис. 2. Пример записи шума: Noise – размах шума, Test – размах тестового сигнала от постоянного поля при перемене полярности

Результаты замеров представлены в таблице.

Таблица

Размах шума сенсора в единицах магнитной индукции

Сенсор №	1	2	3	4	5
Размах шума, мкТл	2	3,5	3	2,8	3

Как видно, имеет место достаточно заметный разброс (почти в 2 раза) интенсивности шума, присущего разным экземплярам сенсоров из одной партии. В целом же можно считать, что размах шумов сенсоров данного типа при измерениях постоянного поля не превышает 4 мкТл, в то время как у сенсора SS495 он на порядок больше.

#### 4. Шумы при измерении переменных полей

Для изучения шумов сенсоров при измерении переменных магнитных полей они размещались в таком же магнитном экране и с тем же соленоидом, что и при исследовании шумов в постоянном поле. Но теперь в соленоид подавался переменный синусоидальный ток с выхода звукового генератора ГЗ-34. Средневыпрямленное значение переменного тока, протекавшего по соленоиду, задавалось и измерялось по падению переменного напряжения на образцовом резисторе, включенном последовательно с соленоидом.

Затем синусоидальное напряжение, уже переменное, с выхода испытуемого сенсора подавалось на вход анализатора гармоник TF-455E фирмы Marconi – селективного приемника сигналов звуковых частот в диапазоне от 16 Гц до 16 кГц с полосой пропускания 4 Гц. Переменное магнитное поле заданной частоты, создаваемое соленоидом, преобразовывалось испытуемым сенсором в соответствующее ему переменное напряжение, выделялось из сопутствующих ему напряжений других частот (в том числе и шумов) и превращалось на выходе анализатора гармоник в постоянное напряжение, пропорциональное индукции действующего переменного поля заданной частоты и напряжению шумов сенсора вблизи этой частоты (в полосе 4 Гц). Выпрямленное напряжение с выхода анализатора гармоник подавалось на вход уже упомянутого запоминающего осциллографа, выполнявшего функции самописца.

Переменное магнитное поле заданной частоты и индукции воздействовало на испытуемый сенсор, и показания с выхода анализатора гармоник фиксировались импровизированным самописцем. На рис. 3 представлен пример диаграммы, записанной с выхода анализатора гармоник при действии на сенсор магнитного поля заданной частоты и индукции. На рисунке выделены минимальное  $U_1$  и максимальное  $U_2$  показания, полученные в течение нескольких минут воздействия на сенсор переменного поля.

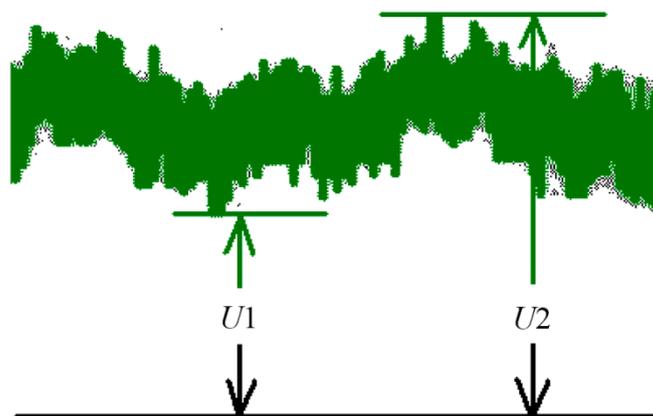


Рис. 3. Диаграмма показаний на выходе анализатора гармоник

Полусумма показаний  $U1$  и  $U2$  является мерой воздействия переменного поля с известным средневыпрямленным значением его магнитной индукции, а их разность соответствует размаху собственного шума сенсора на данной частоте. Отсюда нетрудно получить выражение

$$B_S = 2 \cdot \frac{U2 - U1}{U1 + U2} \cdot B_T. \quad (3)$$

Здесь  $B_S$  – размах шума сенсора на данной частоте, выраженный в единицах средневыпрямленного значения индукции синусоидального магнитного поля  $B_T$ .

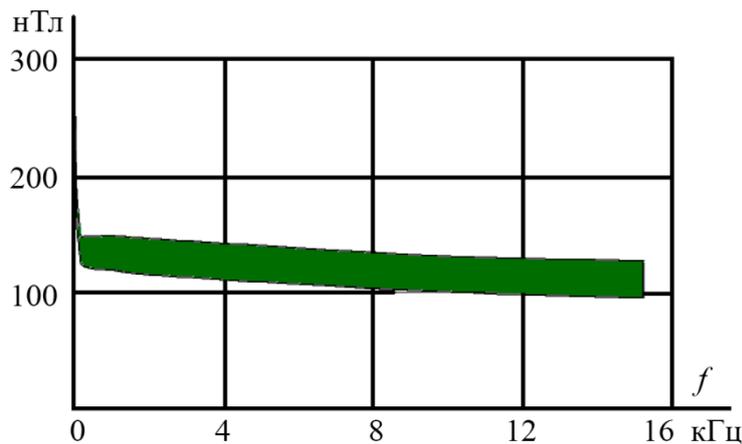


Рис. 4. Разброс шумов пяти сенсоров во всем диапазоне частот измеряемых переменных полей

На рис. 4 представлены результаты измерения шумов сенсоров в диапазоне частот от 20 Гц до 16 кГц. Как видно из рисунка, шумы монотонно снижаются с увеличением частоты измеряемого поля. В диапазоне частот, охваченных измерениями, они снизились примерно в 2,5 раза от 250 до 110 нТл. Разброс значений шумов, присущих пяти исследованным сенсорам, составил порядка 20 %.

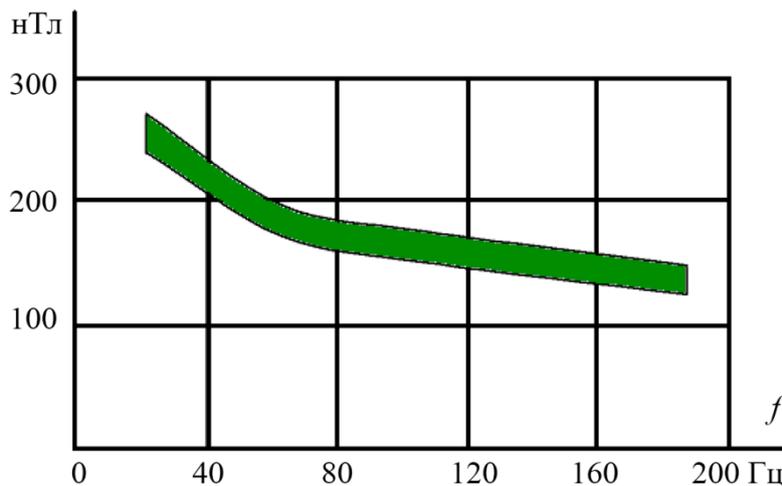


Рис. 5. Шумы в начале исследованного диапазона частот

Из рис. 5 видно, что наиболее интенсивно шумы снижаются с повышением частоты поля до частот порядка 200 Гц. Начиная с частот в несколько сотен герц, они снижаются уже не столь значительно, что проиллюстрировано рис. 6.

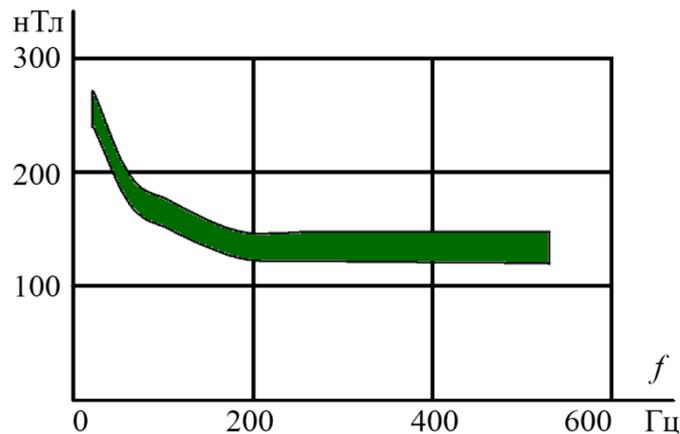


Рис. 6. Шумы в более широком диапазоне частот

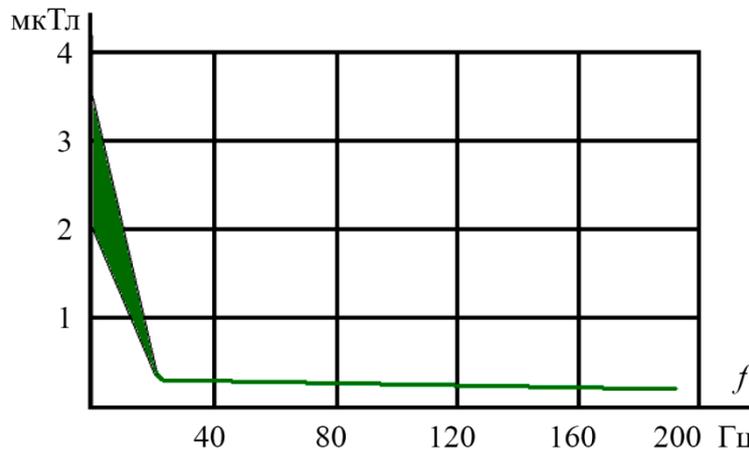


Рис. 7. Шумы в постоянном и переменном магнитных полях

И наконец, рис. 7 иллюстрирует разницу в интенсивности шумов сенсора при измерении им постоянного и переменного полей, ради чего и были предприняты исследования. Из рисунка видно, что шумы сенсора при измерении переменных магнитных полей приблизительно в 40 раз меньше, чем при измерении постоянных.

## 5. Заключение

Выполненное исследование показало, что шумовые флуктуации выходного напряжения обследованных микросхемных сенсоров 1SA-1M при измерении переменного магнитного поля значительно меньше (в десятки раз), чем при измерении постоянного поля, и не превышают в размахе десятых долей микротесла.

Полученные конкретные результаты, в принципе, не являются неожиданными, но позволяют во многих случаях использовать в вихретоковой дефектоскопии микросхемные сенсоры, основанные на эффекте Холла, вместо менее технологичных индуктивных преобразователей.

Можно надеяться, что выявленные преимущества свойственны и преобразователям Холла других производителей, поскольку при их изготовлении используются во многом схожие технологии.

## Благодарность

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).*

## Литература

1. Антонов В. Г., Петров Л. М., Щелкин А. П. Средства измерений магнитных параметров материалов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
2. Родигин Н. М., Коробейникова И. Е., Контроль качества изделий методом вихревых токов. – М., Свердловск : Машгиз, 1958. – 64 с.
3. High-sensitivity low-noise miniature fluxgate magnetometers using a flip chip conceptual design / C.-C. Lu, J. Huang, P.-K. Chiu, S.-L. Chiu, J.-T. Jeng // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14 (8). – P. 13815–13829. – DOI: 10.3390/s140813815.
4. Бараночников М. Л. Микромагнитоэлектроника : Т. 1. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 541 с.
5. Патраманский Б. В. Разработка, создание и эксплуатация средств магнитных методов контроля состояния магистральных газопроводов. – Екатеринбург : Банк культурной информации, 2006. – 240 с.
6. Панчишин Ю. М., Усатенко С. Т. Измерение переменных магнитных полей. – Киев : Техника, 1973. – 140 с.
7. Абрамзон Г. В., Обоишев Ю. П. Индукционные измерительные преобразователи переменных магнитных полей. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 117 с.
8. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // *Sensors*. – 2011. – Vol. 11 (3). – P. 2525–2565. – DOI: 10.3390/s110302525.
9. Реутов Ю. Я., Особенность намагничивания ферромагнетика переменным полем // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2020. – Iss. 6. – P. 35–47. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.6.035-047. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2020-6/2020-6\\_313.html](http://dream-journal.org/issues/2020-6/2020-6_313.html)
10. Reutov Yu. Ya., Shcherbinin V. E., Volkov A. V. Possibilities for the selection of magnetic field transducers for nondestructive testing // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2014. – Vol. 50. – P. 760–768. – DOI: 10.1134/S1061830914120080.
11. Дрожжина В. И., Реутов Ю. Я., Янус Р. И. О магнитных шумах кольцевых магнитных модуляторов // *Сборник трудов Института физики металлов АН СССР*. – Свердловск, 1967. – Вып. 26. – С. 82–85.
12. Hooge F. N.  $1/f$  noise is no surface effect // *Physics Letters A*. – 1969. – Vol. 29 (3). – P. 139–140. – DOI: 10.1016/0375-9601(69)90076-0.
13. The  $1/f$  noise of InP based 2DEG devices and its dependence on mobility / J. Berntgen, K. Heime, W. Daumann, U. Auer, F.-J. Tegude, A. Matulionis // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1999. – Vol. 46 (1). – P. 194–203. – DOI: 10.1109/16.737459.
14. Tacano M. Hooge fluctuation parameter of semiconductor microstructures // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1993. – Vol. 40 (11). – P. 2060–2064. – DOI: 10.1109/16.239749.
15. Mouetsi S., El Hdiy A., Bouchemat M. The  $1/f$  noise in a two-dimensional electron gas: temperature and electric field considerations // *Elektronika ir Elektrotechnika*. – 2015. – Vol. 92 (4). – P. 3–6.
16. Сысоева С. Датчики магнитного поля // *Компоненты и технологии*. – 2012. – № 1. – С. 19–32.
17. Popovic R. S. High resolution hall magnetic sensors // *PROC. 29th International Conference on Microelectronics (MIEL 2014), Belgrade, Serbia, MAY 12–14, 2014*, pp 69–74.
18. Reutov Yu. Ya. Some aspect of using a magnetoresistive transducer // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2001. – Vol. 37. – P. 859–863. – DOI: 10.1023/A:1016817517351.
19. Simulation and Implementation of a high sensitive differential eddy current giant magnetoresistance probe for non-destructive testing / D. R. Touil, A. C. Lahrech, B. Helifa,

- I. K. Lefkaier // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58. – P. 833–846. – DOI: 10.1134/S1061830922090029.
20. Kogan L. K., Stashkov A. N., Nichipuruk A. P. Quality control of soldering of side walls of clamps in current-carrying connections of electric machines taking into account the influence of their sizes // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58. – P. 1142–1152. – DOI: 10.1134/S1061830922700140.
21. Kogan L. Kh., Stashkov A. N. Capabilities of eddy current NDT of soldered current-carrying joints in submersible electrical equipment for oil and gas industry // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2023. – Iss. 4. – P. 47–59. – DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059. – URL: [http://dream-journal.org/issues/2023-4/2023-4\\_403.html](http://dream-journal.org/issues/2023-4/2023-4_403.html)
22. A novel eddy current sensor for displacement measurement with high accuracy and long range / P. Tong, L. Wu, A. Yanchen, R. Su, Y. Wu // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23 (11). – P. 12066–12075. – DOI: 10.1109/JSEN.2023.3266564.
23. Загидулин Р. В., Бакиев А. Т. Определение параметров стресс-коррозионных трещин магистрального газопровода по результатам вихретокового контроля // Контроль. Диагностика. – 2023. – № 12. – С. 24–34. – DOI: 10.14489/td.2023.12.pp.024-034.
24. Вихретоковый контроль качества тонкостенных труб из тугоплавкого сплава / В. Г. Атавин, Ю. Г. Смирнов, Р. Р. Исхужин, З. И. Завьялов, А. А. Узких, О. С. Юрченко, М. А. Ключникова // Контроль. Диагностика. – 2024. – № 4. – С. 29–37. – DOI: 10.14489/td.2024.04.pp.029-037.