

УДК 621.3.014.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Особенности обработки сигнала вихретокового датчика

А. Г. Дмитриенко¹, К. А. Семкина², Н. С. Ульянин³, Б. В. Цыпин⁴

^{1,2,3}Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{1,2,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹info@niifi.ru, ²po444t@mail.ru, ³kolianul@mail.ru, ⁴cyпин@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Токовихревые датчики нашли широкое распространение для решения различных технических задач. Эффективность использования датчиков зависит от применяемого способа обработки его выходного сигнала. Целью работы является исследование возможностей измерения по частоте выходного сигнала датчика, включенного в автогенераторную схему. *Материалы и методы.* Выполнено математическое моделирование данного способа и его сравнение с традиционным способом измерения по амплитуде выходного сигнала. Проведено моделирование глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля с помощью программы ELCUT. *Результаты.* Получены зависимости параметров датчика от расстояния до объекта контроля и рабочей частоты датчика. *Вывод.* Результаты исследования подтвердили эффективность применения автогенераторной схемы включения токовихревого датчика и показали, что рабочий диапазон датчика при диаметре катушки индуктивности 15 мм составляет не более 7 мм.

Ключевые слова: токовихревой датчик, измерение расстояния до объекта, автогенераторная схема, моделирование, программа ELCUT

Для цитирования: Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Особенности обработки сигнала вихретокового датчика // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 52–63. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Features of eddy current sensor signal processing

A.G. Dmitrienko¹, K.A. Semkina², N.S. Ulyanin³, B.V. Tsyпин⁴

^{1,2,3}Scientific-research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{1,2,4}Penza State University, Penza, Russia

¹info@niifi.ru, ²po444t@mail.ru, ³kolianul@mail.ru, ⁴cyпин@yandex.ru

Abstract. *Background.* Current-vortex sensors are widely used to solve various technical problems. The efficiency of using sensors depends on the method used to process its output signal. The purpose of the work is to study the possibilities of measuring the frequency of the output signal of a sensor included in an auto-generator circuit. *Materials and methods.* Mathematical modeling of this method and its comparison with the traditional method of measuring the amplitude of the output signal are performed. The depth of penetration and distribution of eddy currents in a conductive object at different frequencies of an alternating magnetic field is modeled using the ELCUT program. *Results.* The dependences of the sensor parameters on the distance to the monitoring object and the operating frequency of the sensor are obtained. *Conclusion.* The results of the study showed the effectiveness of using

an autogenerator circuit for switching on a current-vortex sensor and showed that the operating range of the sensor with an inductor diameter of 15 mm is no more than 7 mm.

Keywords: current vortex sensor, measuring the distance to an object, auto-generator circuit, modeling, ELCUT program

For citation: Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsypin B.V. Features of eddy current sensor signal processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):52–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Введение

Метод вихретокового контроля основан на измерении параметров сигнала, зависящего от взаимодействия переменного электромагнитного поля датчика с электропроводящим объектом контроля.

Достоинством метода является отсутствие непосредственного механического контакта между датчиком и объектом контроля.

Метод применяют для оценки поверхностных и подповерхностных дефектов, для измерения толщины покрытий или слоев, определения электрической проводимости и магнитной проницаемости материала, оценки металлургических, механических и других свойств изделия. С помощью метода также можно определять параметры вибрации токопроводящих деталей и узлов [1].

Обычно при работе с вихретоковыми датчиками производят измерение интенсивности или амплитуды его выходного сигнала.

В настоящей работе рассмотрена возможность оценки контролируемых параметров по частоте выходного сигнала вихретокового датчика, включенного в автогенераторную схему [2, 3].

Ранее эти вопросы были кратко изложены в докладе «Оптимизация структуры обработки сигнала вихретокового датчика» [4].

Обработка сигнала вихретокового датчика

При обработке сигнала вихретокового датчика требуется выделение информации о контролируемом объекте на фоне мешающих факторов [5].

Применяют два способа отстройки от мешающих факторов. Первый заключается в стабилизации условий контроля. Значение мешающего фактора требуется стабилизировать по всему объекту контроля во всех режимах измерения [6].

Когда известно, на какой параметр выходного сигнала влияет мешающий фактор, становится возможным применение второго способа. Мешающим, неинформативным фактором может быть амплитуда, частота или фаза выходного сигнала датчика. Способ заключается в подавлении мешающего фактора или в выделении полезной информации.

В случае, когда изменения мешающего фактора влияют на амплитуду сигнала, применяют фазовый способ выделения информации, основанный на сравнении фаз двух входных сигналов близких частот.

В случае, когда изменения мешающего фактора влияют на фазу выходного сигнала, применяют амплитудный способ. Принцип амплитудного способа обработки сигнала поясняет рис. 1.

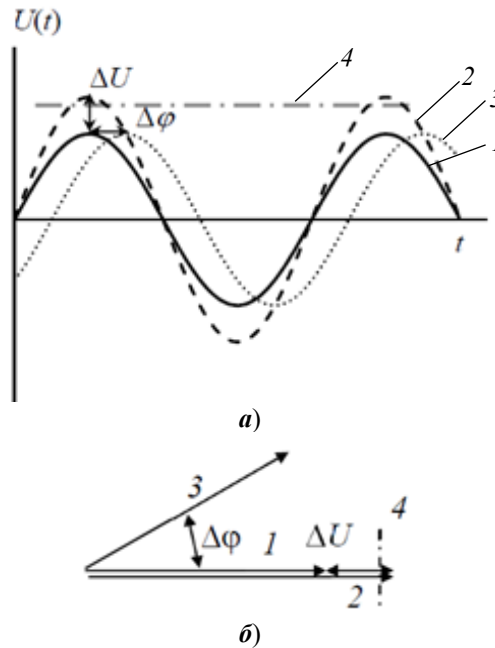


Рис. 1. Принцип амплитудного способа выделения информации:
 a – изменения синусоидального выходного сигнала датчика;
 b – изменения сигнала, выраженные в векторной форме:
 1 – при отсутствии влияющих факторов; 2 – вызванные дефектом;
 3 – вызванные мешающим фактором; 4 – порог сигнализации

В случае неоднозначного влияния на параметры сигнала дефекта и мешающих факторов используют комбинированный амплитудно-фазовый способ. При амплитудно-фазовом способе выделяют составляющую выходного сигнала датчика, ортогональную напряжению мешающего фактора, на рис. 1, b она перпендикулярна вектору 3.

Принцип выделения полезного сигнала амплитудно-фазовым способом поясняет рис. 2.

Частотный метод предполагает включение вихретокового преобразователя в колебательный контур автогенератора. Информация об измеряемом параметре в этом случае содержится в частоте выходного сигнала датчика.

Сравнительный анализ амплитудного и частотного методов обработки выходного сигнала датчика

Сравнение методов проведем на примере измерения расстояния между парамагнитным алюминиевым объектом контроля (мишенью) и вихретоковым датчиком.

Схема частотного способа измерения приведена на рис. 3. Датчик представлен в виде последовательного колебательного контура с емкостью 100 пФ и начальным значением индуктивности при $S = 0$, равным 8,5128 мкГн (значения соответствуют параметрам датчика, изготовленного для проведения эксперимента), что соответствует резонансной частоте 5,4549 МГц. Расстояние S от объекта до датчика влияет на индуктивность L катушки датчика и, соответственно, на частоту F автоколебаний генератора.

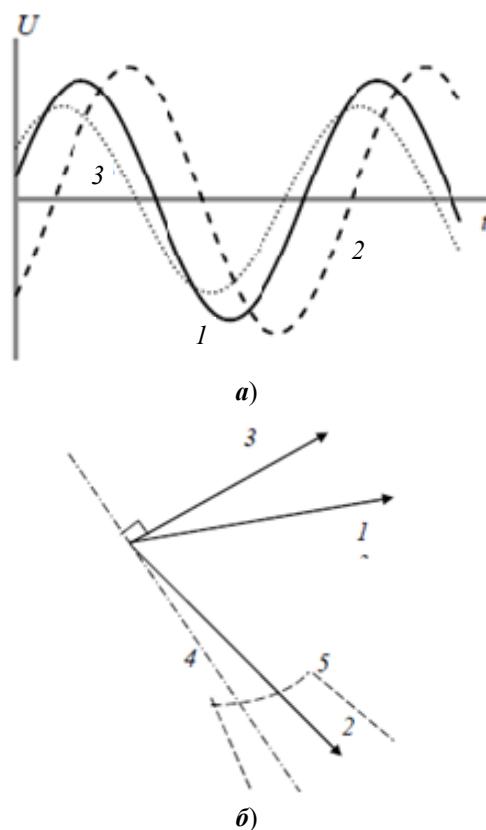


Рис. 2. Принцип выделения полезного сигнала амплитудно-фазовым способом [3]:

a – временная развертка; **б** – векторная диаграмма амплитудно-фазового способа подавления мешающего фактора: 1 – при отсутствии влияющих факторов; 2 – под воздействием дефекта; 3 – под воздействием мешающего фактора; 4 – направление, перпендикулярное вектору мешающего фактора; 5 – порог срабатывания дефектоскопа

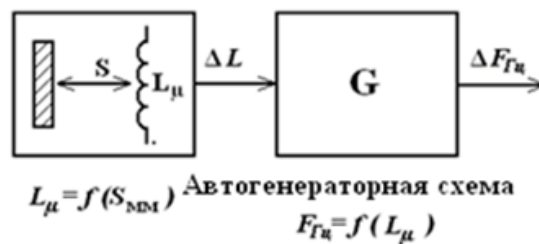


Рис. 3. Схема частотного способа измерения

В табл. 1 показана зависимость индуктивности L и частоты F и ее изменения ΔF на каждом участке перемещения от изменения расстояния S в пределах от 0 до 12 мм [4].

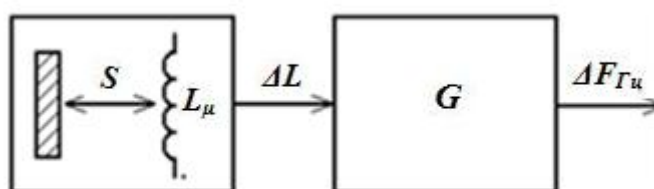
Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением расстояния между датчиком и объектом контроля чувствительность метода уменьшается.

Схема амплитудного способа измерения приведена на рис. 4.

Таблица 1

Зависимость индуктивности L , частоты F и ее изменения ΔF от расстояния S для алюминиевой модели объекта контроля [4]

Величина перемещения S , мм	Индуктивность L , мкГн	F , кГц	ΔF , Гц
0,00	7,0258	6004,44	
1,20	7,4444	5833,18	171258
2,40	7,7342	5722,85	110328
3,60	7,9442	5646,70	76147
4,80	8,1008	5591,86	54846
6,00	8,2187	5551,61	40253
7,20	8,3095	5521,19	30415
8,40	8,3797	5498,01	23175
9,60	8,4348	5480,03	17987
10,80	8,4780	5466,05	13980
12,00	8,5128	5454,86	11184



Автогенераторная схема

$$L_{\mu} = f(S_{\text{мм}}) \quad F_{\text{Гц}} = f(L_{\mu})$$

Рис. 4. Схема амплитудного способа измерения

Измерение индуктивности катушки датчика производится на фиксированной частоте. Для измерения индуктивности используется схема измерительного моста. В ней $L_1 = 7,0258$ мкГн – опорная индуктивность, равная начальному значению индуктивности обмотки датчика L_2 при $S = 0$. Сопротивления $R_1 = R_2 = 220$ Ом образуют остальные плечи мостовой схемы.

Выходное напряжение диагонали моста равно:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} R \left(\frac{1}{R + 2\pi f L_1} - \frac{1}{R + 2\pi f L_2} \right),$$

где напряжение $U_{\text{пит}} = 5$ В – переменное напряжение питания диагонали моста частоты $f = 5$ МГц. Зависимости индуктивности L_2 , выходного напряжения мостовой схемы $U_{\text{вых}}$ и его изменения ΔU от перемещения S представлены в табл. 2. Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением расстояния между датчиком и объектом контроля чувствительность метода уменьшается аналогично частотному способу измерения.

Таблица 2

Зависимость индуктивности L , выходного напряжения измерительного моста $U_{\text{вых}}$ и его изменения $\Delta U_{\text{вых}}$ от перемещения S [4]

Перемещения S , мм	Индуктивность L , мкГн	$U_{\text{вых}}$, В	$\Delta U_{\text{вых}}$, В
0,00	7,0258	0	0,0723
1,20	7,4444	0,0723	
2,40	7,7342	0,1199	0,0476
3,60	7,9442	0,1533	0,0334
4,80	8,1008	0,1776	0,0243
6,00	8,2187	0,1956	0,0180
7,20	8,3095	0,2092	0,0136
8,40	8,3797	0,2196	0,0104
9,60	8,4348	0,2278	0,0082
10,80	8,4780	0,2341	0,0063
12,00	8,5128	0,2392	0,0051

Сопоставим частотный и амплитудный способы измерения расстояния S от токовихревого датчика до мишени с помощью оценки возможности измерения выходных величин типовым микроконтроллером.

При измерении максимальной выходной частоты сигнала датчика, равной 6 МГц, за 1 с можно получить $6 \cdot 10$ единиц выходного кода в 6 импульсах, используемых для измерения. В конце диапазона измерения при расстоянии $S = 12$ мм чувствительность составляет $\Delta = 1277/1,2 \approx 1000$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность 0,1 %.

В тех же условиях в начале диапазона чувствительность составляет $\Delta = 16643/1,2 \approx 13900$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность $\delta = 100/13900 \approx 0,007$ %.

При измерении напряжения типовой микроконтроллер обеспечивает $2^{12} = 4096$ единиц выходного кода. В конце диапазона измерения чувствительность составляет $\Delta = 87/1,2 \approx 70$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность 1,7 %. В начале диапазона чувствительность составляет $\Delta = 1238/1,2 \approx 1032$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность $\delta = 100/1032 \approx 0,1$ %.

Таким образом, чувствительность амплитудного способа измерения в $1000/70 \approx 14$ раз ниже в конце диапазона измерения и в $13900/1032 \approx 13,5$ раза ниже в начале диапазона. Погрешность амплитудного способа измерения в конце диапазона в 17 раз выше, а в начале диапазона выше в 14 раз.

Проведенный сравнительный анализ математических моделей и оценка возможности измерения выходных величин типовым микроконтроллером показали существенное преимущество частотного принципа измерения перемещения по сравнению с аналоговым методом.

Моделирование параметров вихретокового датчика с помощью программы ELCUT

Анализ глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля позволяет выявить требования к параметрам токовихревого датчика.

Для исследования удобно использовать программу ELCUT, предназначенную для двумерного моделирования методом конечных элементов [8]. Программа позволяет определить распределение вихревых токов в проводящем теле от воздействия переменного магнитного поля при различной его частоте. Благодаря программе ELCUT возможно определить необходимую индуктивность катушки датчика в зависимости от расстояния до объекта (мишени).

Рассмотрим распределение вихревых токов в алюминиевой пластине в зависимости от частоты переменного магнитного поля, и определим зависимость индуктивности катушки датчика от перемещения мишени на расстояние до 25 мм. В качестве исходных данных для моделирования примем, что внешний диаметр катушки индуктивности датчика составляет 15 мм, диаметр мишени 100 мм, а ее толщина 5 мм. Сила переменного тока в катушке 0,01 А.

На рис. 5 приведены полученные в результате моделирования конфигурации распределения вихревых токов в толщине проводящего объекта на разной частоте переменного магнитного поля.

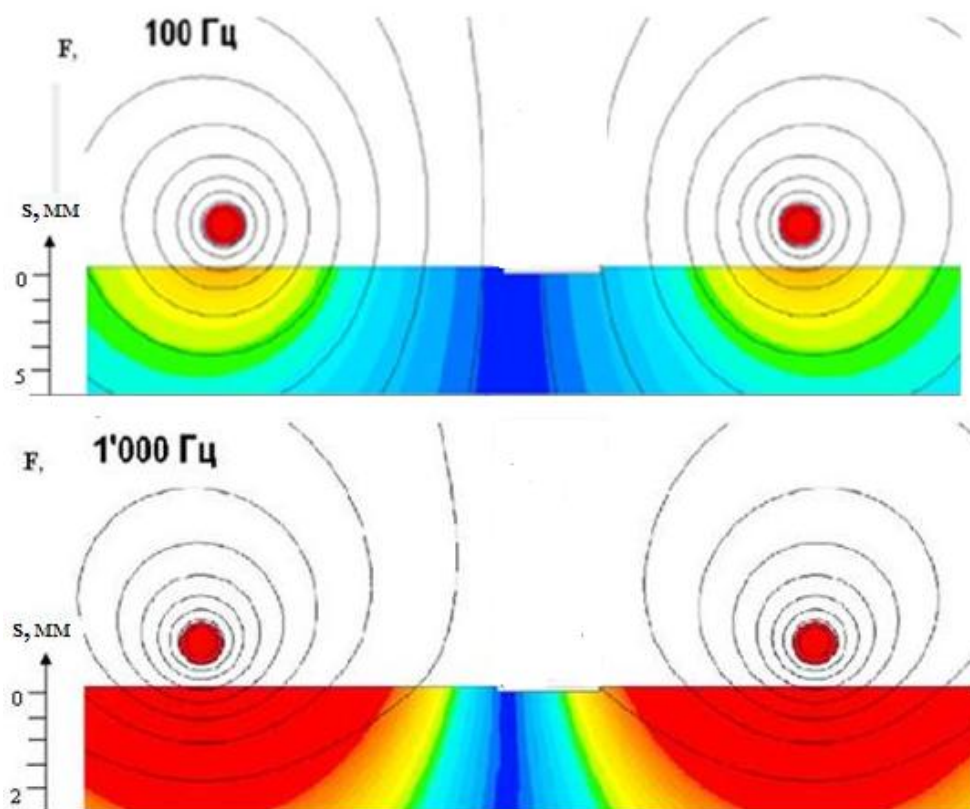


Рис. 5. Распределение вихревых токов в мишени при различной частоте переменного магнитного поля [8]: F – частота переменного магнитного поля; s – толщина проводящего объекта

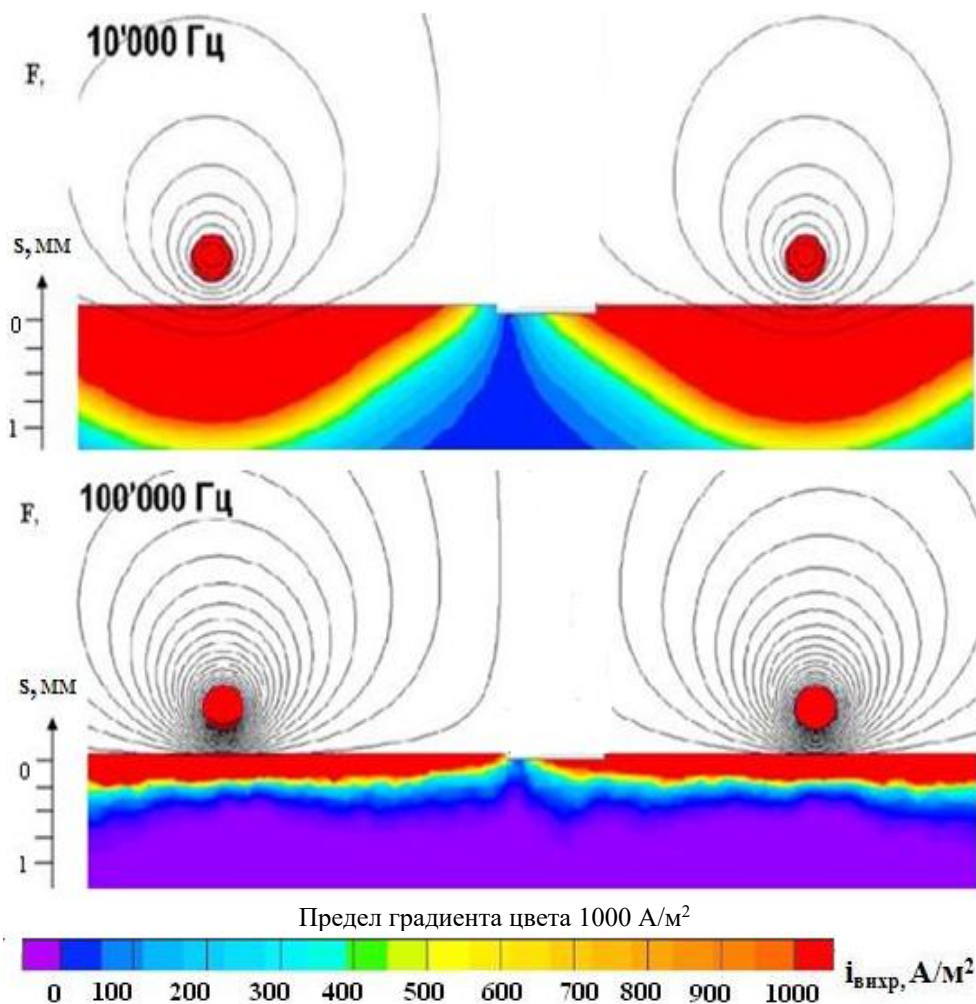


Рис. 5. Окончание

С увеличением частоты возрастает концентрация вихревых токов ближе к поверхности со стороны источника поля, концентрируются вихревые токи в основном под проводом. В результате моделирования выявлены два максимума концентрации вихревых токов ввиду представления катушки индуктивности в среде программы ELCUT как среза витка медного провода, на который мы смотрим сбоку.

Программа позволяет подробно изучить связанные с вихревыми токами явления и определить численные значения вихревых токов. На рис. 6 приведен график зависимости потокосцепления катушки индуктивности в зависимости от расстояния до мишени, полученный на основании моделирования в программе ELCUT.

Численные значения потокосцепления и индуктивности катушки в зависимости от перемещения приведены в табл. 3. График позволяет сделать вывод о том, что при диаметре катушки индуктивности 15 мм датчик будет эффективно работать на расстоянии не более 7 мм до мишени.

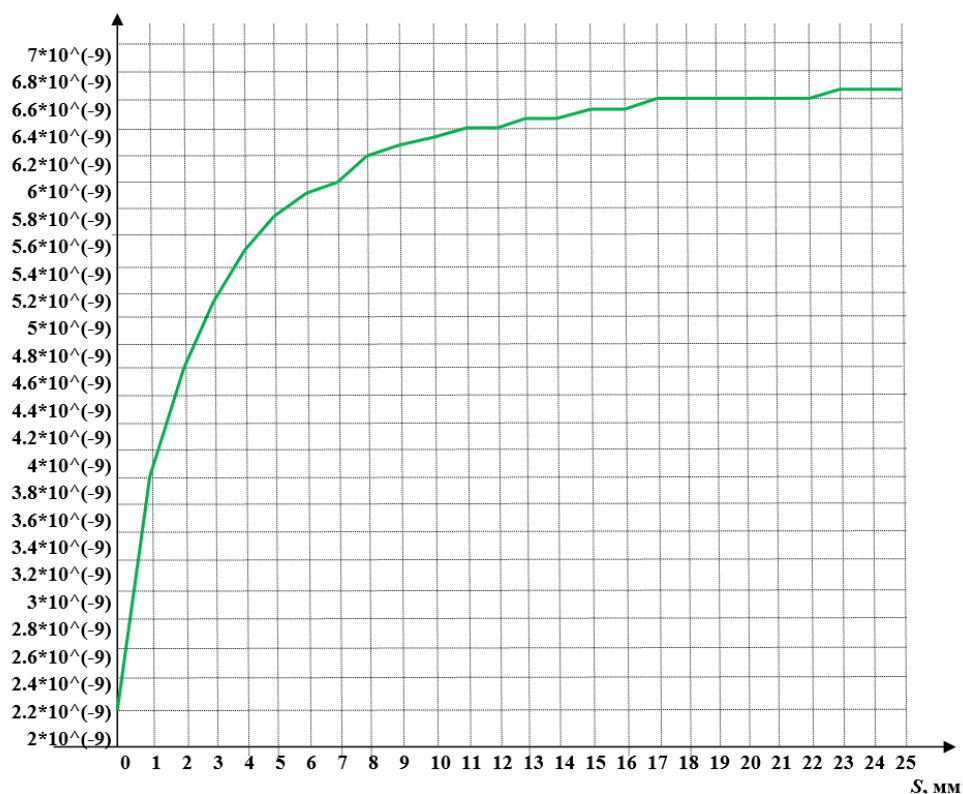


Рис. 6. График зависимости потокосцепления катушки индуктивности от перемещения алюминиевой проводящей мишени на расстояние 25 мм [9]

Таблица 3

Пото́косцепле́ние и индукти́вность катушки
в зависимости от расстояния до алюминиевой мишени

S , мм	Ψ , Вб	L , Гн	S , мм	Ψ , Вб	L , Гн
0	2,2469E-09	2,2469E-07	13	6,4525E-09	6,4525E-07
1	3,8537E-09	3,8537E-07	14	6,4484E-09	6,4484E-07
2	4,643E-09	4,643E-07	15	6,5061E-09	6,5061E-07
3	5,1369E-09	5,1369E-07	16	6,5237E-09	6,5237E-07
4	5,5051E-09	5,5051E-07	17	6,5429E-09	6,5429E-07
5	5,7289E-09	5,7289E-07	18	6,5571E-09	6,5571E-07
6	5,9233E-09	5,9233E-07	19	6,5691E-09	6,5691E-07
7	6,0316E-09	6,0316E-07	20	6,5812E-09	6,5812E-07
8	6,1795E-09	6,1795E-07	21	6,5893E-09	6,5893E-07
9	6,2624E-09	6,2624E-07	22	6,5782E-09	6,5782E-07
10	6,3248E-09	6,3248E-07	23	6,6074E-09	6,6074E-07
11	6,3666E-09	6,3666E-07	24	6,6115E-09	6,6115E-07
12	6,3958E-09	6,3958E-07	25	6,6161E-09	6,6161E-07

Заключение

Эффективность работы вихретокового датчика зависит от используемого способа обработки выходного сигнала. Могут применяться фазовый, амплитудный или частотный способы.

Обычно применяют измерения по амплитуде, но проведенные исследования [2, 3, 7] показывают, что при включении датчика в автогенераторную схему измерения частоты выходного сигнала позволяют получить лучшие результаты по сравнению с традиционно используемым измерением амплитуды выходного сигнала.

Проведенное моделирование в среде ELCUTE глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля подтвердило полученные результаты. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными [2].

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Нефедьев Д. И., Трофимов А. А. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 1. С. 4–10.
2. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Модель стабилизации вихретоковых датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 58–68. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
3. Жуков В. К., Миляев Д. В. Смешанное включение токовихревого датчика // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова : сб. факультета автоматики и вычислительной техники. Томск : Изд-во Томского университета, 1969.
4. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Оптимизация структуры обработки сигнала вихретокового датчика // Актуальные проблемы РКП и ИТ : сб. докладов ВНТК. М. : АО«РКС», 2018.
5. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля. Новосибирск : СГУПС, 2019. 98 с.
6. Грабовский А. В., Петров Г. А. Многоканальные сканеры вихретокового контроля // Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. 2016. № 9. С. 42–48.
7. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л. : Энергия, 1968. 248 с.
8. elcut.ru [официальный сайт]. URL: https://elcut.ru/advanced/eddy-current_sensor_r.htm (дата обращения: 16.12.24).

References

1. Dmitrienko A.G., Nefed'ev D.I., Trofimov A.A. Eddy current sensing elements for non-contact displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(1):4–10. (In Russ.)
2. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsypin B.V. Model for stabilization of eddy current displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):58–68. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
3. Zhukov V.K., Milyaev D.V. Mixed inclusion of eddy current sensor. *Izve-stiya Tomskogo ordena trudovogo krasnogo znameni politekhnicheskogo instituta imeni S.M. Kirova: sb. fakul'teta avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki = Proceedings of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor Polytechnic Institute named after S.M. Kirov: bulletin of the faculty of automation and computing technology*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 1969. (In Russ.)
4. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsypin B.V. Optimization of the structure of processing the signal of the eddy current sensor. *Aktual'nye problemy RKP i IT: sb. dokladov VNTK = Actual problems of RCP and IT: collection of reports of VNTK*. Moscow: AO«RKS», 2018. (In Russ.)

5. Bobrov A.L., Vlasov K.V., Bekher S.A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushayushchego kontrolya = Fundamentals of eddy current non-destructive testing*. Novosibirsk: SGUP-Sa, 2019:98. (In Russ.)
6. Grabovskiy A.V., Petrov G.A. Multi-channel eddy current testing scanners. *Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet «LETI» im. V.I. Ul'yanova = Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov*. 2016;(9):42–48. (In Russ.)
7. Novitskiy P.V. *Osnovy informatsionnoy teorii izmeritel'nykh ustroystv = Fundamentals of information theory of measuring devices*. Leningrad: Energiya, 1968:248. (In Russ.)
8. *elcut.ru*. Available at: https://elcut.ru/advanced/eddy-current_sensor_r.htm (accessed 16.12.24).

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Геннадиевич Дмитриенко

доктор технических наук, доцент, генеральный директор, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10); заведующий кафедрой ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: info@niifi.ru

Aleksey G. Dmitrienko

Doctor of engineering sciences, associate professor, general manager, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia); head of the sub-department of rocket, space and aviation instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Александровна Семкина

магистрант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40); специалист, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: po444t@mail.ru

Kristina A. Semkina

Master's degree student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia); specialist, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Николай Сергеевич Ульянин

начальник центра проектирования систем № 1, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: kolianul@mail.ru

Nikolai S. Ulyanin

Head of the System Design center No. 1, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: cypin@yandex.ru

Boris V. Tsy-pin

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of rocket, space and aviation instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 12.05.2025

Принята к публикации / Accepted 08.06.2025