УДК 620.179.143.5
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.390-397

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ФЕРРОЗОНДОВ

© В. Д. Шаповалов[1], В. П. Кучер[1] ✉, В. С. Безкоровайный[2]

[1] *Кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии», vkucher86@mail.ru;*
[2] *кафедра «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Российская Федерация*

Ключевые слова: обработка сигнала; феррозонд; фильтр Баттерворта; фильтр Чебышева; цифровой сигнал; цифровой фильтр; эллиптический фильтр.

Аннотация: Представлены методы цифровой обработки сигналов феррозондовых датчиков. Рассмотрены причины искажений выходного сигнала шумами и помехами, влияние соотношения амплитуды сигнала и входного диапазона аналого-цифрового преобразователя на качество оцифровки. Дано сравнение эффективности цифровых фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического в среде моделирования SciLab. Показано повышение точности и надежности измерений благодаря снижению уровня шумов и улучшению качества оцифрованного сигнала.

Введение

Феррозонды – это магниточувствительные преобразователи, применяемые для регистрации широкого круга различных физико-технических параметров: магнитного поля и остаточной намагниченности, положения и перемещения в концевых датчиках, а также для считывания магнитных меток при определении расстояния, скорости и других параметров [1]. Благодаря своей простоте и высокой чувствительности феррозонды находят широкое применение в промышленной автоматике, датчиках положения, измерительных системах и устройствах идентификации. Одним из наиболее перспективных направлений является магнитная диагностика с применением феррозондовых датчиков.

Принцип действия феррозондовых датчиков. Феррозонд представляет собой чувствительный элемент, реагирующий на изменение магнитного потока в магнитопроводе.

Выходной сигнал феррозонда имеет однополярную форму, что обеспечивает устойчивость к электромагнитным помехам и повышает точность диагностики.

Эффективность работы феррозонда характеризуется коэффициентом эффективности, определяемым выражением

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{\Phi_{max} + \Phi_{min}}, \quad (1)$$

где Φ_{max} и Φ_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения магнитного потока в магнитопроводе датчика [2].

Информативной частью выходного сигнала феррозонда в большинстве практических задач являются амплитуда сигнала или моменты фронтов импульса. Это предъявляет повышенные требования к форме сигнала и уровню помех. Искажения и шумы существенно ухудшают точность определения момента срабатывания, измеряемой величины и надежность распознавания меток. На реальные сигналы феррозонда часто накладываются как широкополосные шумы вне импульса, так и помехи внутри самого импульса, что приводит к дополнительным погрешностям при измерениях и неверной интерпретации результатов при последующей оцифровке.

Процесс преобразования аналогового сигнала феррозонда в цифровую форму чувствителен к соотношению уровня сигнала и входного диапазона аналого-цифрового преобразователя (**АЦП**). Низкая амплитуда входного сигнала приводит к тому, что значимая часть разрешения АЦП не используется, вследствие чего младшие разряды становятся неустойчивыми и вносят значительную дисперсию в результаты измерений. Усиление входного сигнала до допустимого диапазона АЦП позволяет снизить влияние нестабильности младших разрядов, однако периодические и синхронные помехи могут сохраняться и продолжать ухудшать точность [3].

Анализ оцифрованных сигналов феррозонда показывает наличие периодических составляющих помех, что открывает путь к их подавлению с использованием цифровой обработки сигналов. Применение цифровых фильтров и методов адаптивной фильтрации позволяет улучшить форму выходного сигнала, снизить уровень шумов и, как следствие, повысить точность и надежность измерений. В работе рассматриваются вопросы, связанные с формированием и улучшением управляющих сигналов и уменьшением влияния шумов на результаты оцифровки и обработку данных.

Натурный эксперимент

Феррозонды применяются для измерения различных параметров, в частности, магнитного поля, остаточной намагниченности, чувствительных элементов в концевых датчиках перемещения, для считывания магнитных меток при определении расстояния, скорости и т.п. В большинстве случаев информативной частью являются амплитуда или фронты сигнала, что предъявляет высокие требования к форме и зашумленности выходного сигнала феррозонда. Реальный сигнал феррозонда представлен на рис. 1.

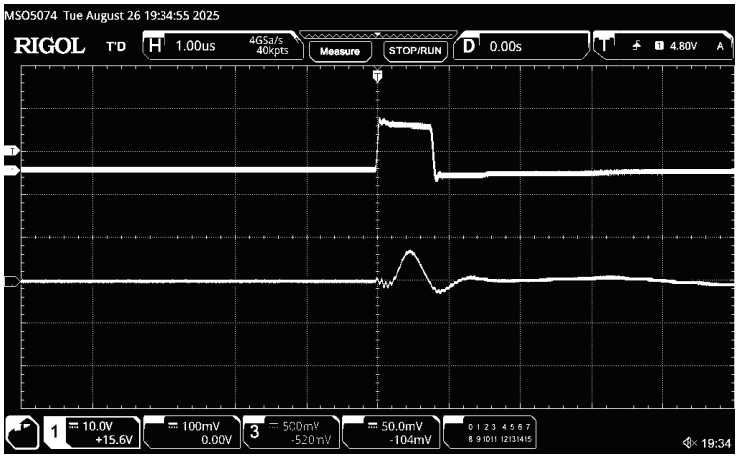


Рис. 1. Осциллограмма управляющего импульса (вверху) и выходного сигнала (внизу) феррозонда

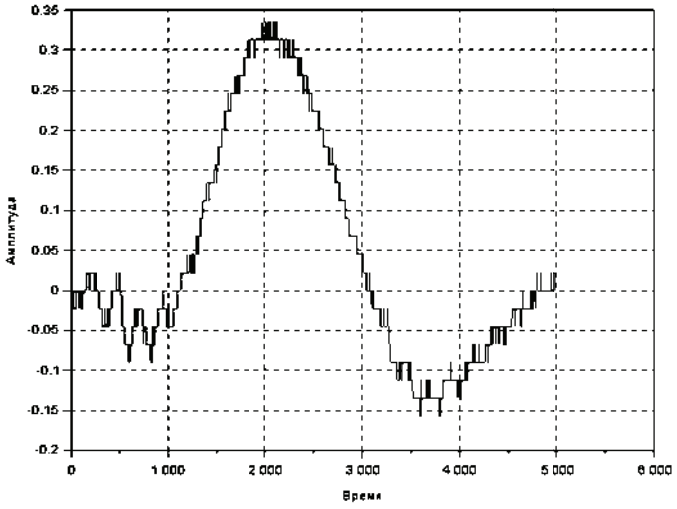


Рис. 2. График оцифрованного выходного импульса феррозонда

По виду выходного сигнала можно отметить наличие шумов, как вне импульса, так и в самом импульсе, что будет приводить к погрешностям при измерениях. При оцифровке выходного сигнала шумы будут приводить к погрешностям оцифровки, что наглядно видно на рис. 2.

На приведенном графике четко видно влияние шумов на работу аналого-цифрового преобразователя, в частности, неустойчивое преобразование младшего разряда, что приводит к резкому повышению погрешности измерений. Вместе с тем следует отметить, что в данном случае имеет место быть некорректное применение АЦП, а именно, на него подан сигнал с малой амплитудой, что привело к использованию части разрядов преобразователя и появлению неустойчивой работы младшего разряда.

Для устранения этого эффекта входной сигнал усилен до допустимого входного значения АЦП, усиленный и оцифрованный выходной импульс представлен на рис. 3.

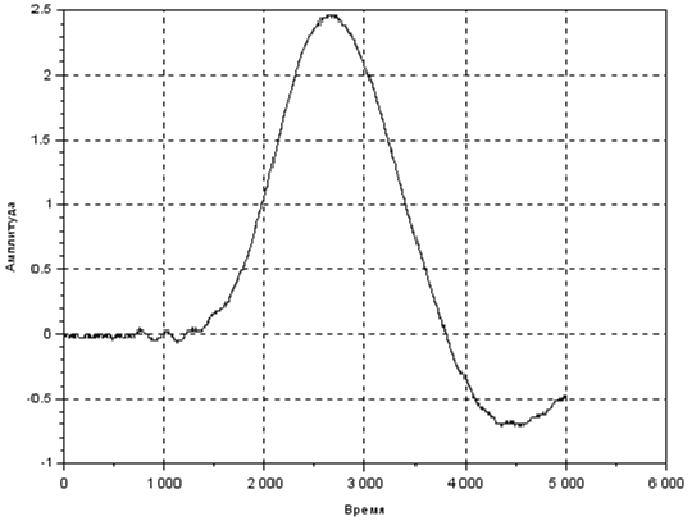


Рис. 3. Выходной усиленный оцифрованный импульс феррозонда

После усиления и оцифровки заметно снижено влияние неустойчивой работы младшего разряда АЦП, однако эта помеха присутствует, что будет приводить к погрешностям при измерениях.

Анализируя оцифрованные сигналы феррозонда (рис. 2 и 3), можно сделать следующий вывод: помехи носят периодический характер, что позволяет предположить применение цифрового фильтра для снижения помех.

Для проверки предложенного подхода использования цифровых фильтров выполнено моделирования процесса фильтрации с использование среды моделирования SciLab 6.02. Scilab – это система компьютерной математики, которая предназначена для выполнения инженерных и научных вычислений [4], где реализовано моделирование цифровых фильтров, в частности фильтров Баттерворта, Чебышева1, Чебышева 2, эллиптического (Кауэра–Золоторева). Для этого в SciLab включена функция цифрового фильтра

$$hz] = iir(n,'lp','butt',[Fc/Fd],[delta\ 1,\ delta\ 2]);$$

где n – порядок фильтра; lp – фильтр низкой частоты; butt – фильтр Баттерворта; Fc/Fd – отношение частоты среза фильтра к частоте дискретизации; delta 1, delta 2 – параметры пульсаций в полосе пропускания и полосе задержки, для фильтра Баттерворта = 0.

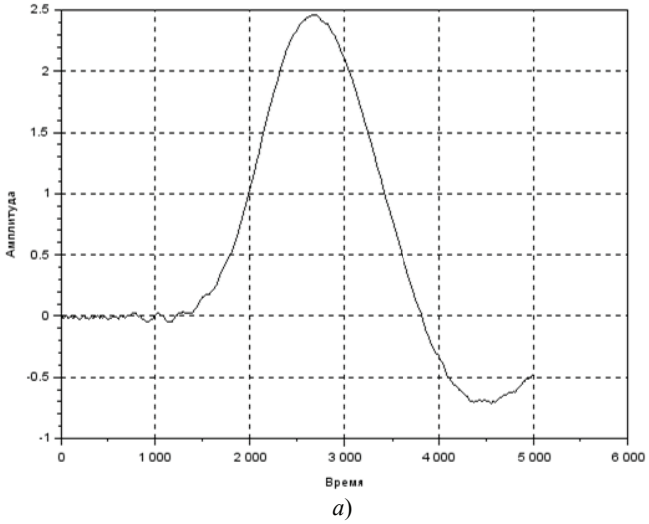
В среде моделирования SciLab разработана программа моделирования, которая считывает числовой массив данных выходного сигнала феррозонда, представляет его в виде графика, строит спектр сигнала, на основании которого выбирается частота среза, выполняет фильтрацию и выводит график отфильтрованного сигнала. Получены графики отфильтрованного сигнала для фильтров Баттерворта, Чебышева и эллиптического.

Программа моделирования:

```
clear()
clc()
// открываем поток Excel
[fd,SST,Sheetnames,Sheetpos]=
xls_open('C:\Users\user\Documents\filtryscilab\impuls3.xls');
// Читаем файл данных
[Oscilogr,TextInd] = xls_read(fd,Sheetpos(1));
// Закрываем поток электронной таблицы
mclose(fd);
Ex_imp = Oscilogr(2000:7000,3);//читаем со 2000 строки по 7000 столбец 3 листа 1

scf(1)
//построить график входного импульса
plot(Ex_imp)
xgrid()
xlabel("Время")
ylabel("Амплитуда")
xtitle("Выходной усиленный оцифрованный импульс")

// построение спектра входного сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
t=1:20;//
n = length(t);
f = linspace(0,Fd,n); // вектор частот
X = fft(Ex_imp)./(length(Ex_imp)/2); // спектр сигнала
```

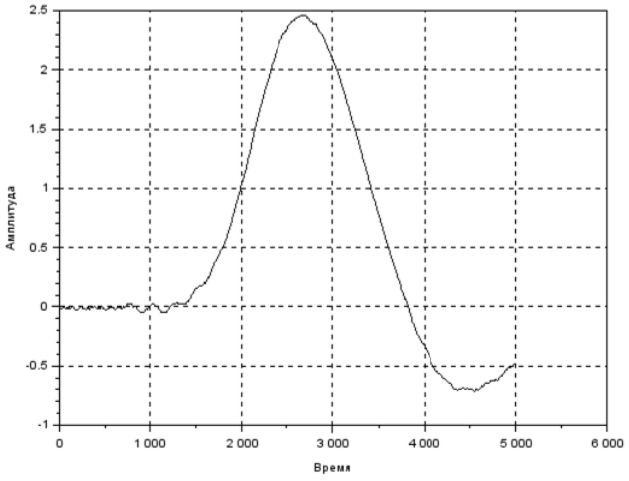
```
scf(2)
plot(f(1:n/2),abs(X(1:n/2))); // вывод графика спектра сигнала, n/к определяет ось x
xgrid()
xtitle("Спектр сигнала Ex_imp","Частота","амплитуда");

//Фильтрация сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
Fc = 10;  // Частота среза, Гц
n = 3;     // Порядок фильтра
[hz] = iir(n,'lp','butt',[Fc/Fd],[0, 0]) //функция фильтра
disp (hz);//печать передаточной функции фильтра
Ex_imp1=matrix(Ex_imp,1,5001)//конвертирование матрицы столбец в матрицу строку
y=flts(Ex_imp1,hz); //фильтрация
scf(3)//создание нового окна
plot(y)
xgrid()
xtitle("Выходной отфильтрованный   сигнал","Время","Амплитуда");

// построение спектра отфильтрованного сигнала
Fd = 400; // Частота дискретизации, Гц
t=1:40;//
n = length(t);
f = linspace(0,Fd,n); // вектор частот
X = fft(y)./(length(y)/2); // спектр сигнала
scf(4)
plot(f(1:n/2),abs(X(1:n/2))); // вывод графика спектра сигнала, n/к определяет ось x
xgrid()
xtitle("Спектр сигнала после фильтра","Частота","амплитуда");
```

В результате моделирования работы фильтров получены графики, показанные на рис. 4.

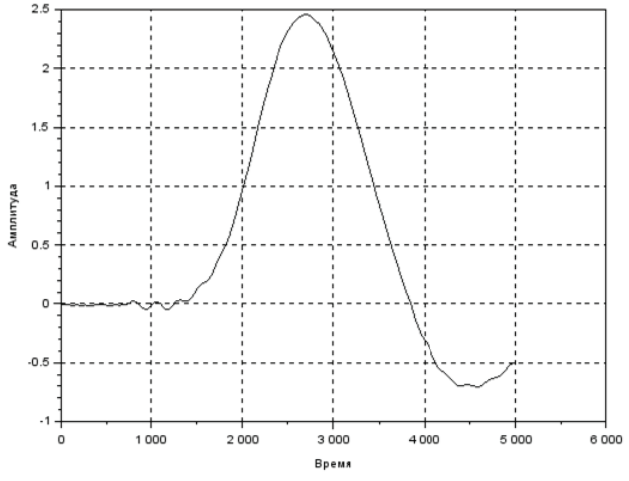


а)

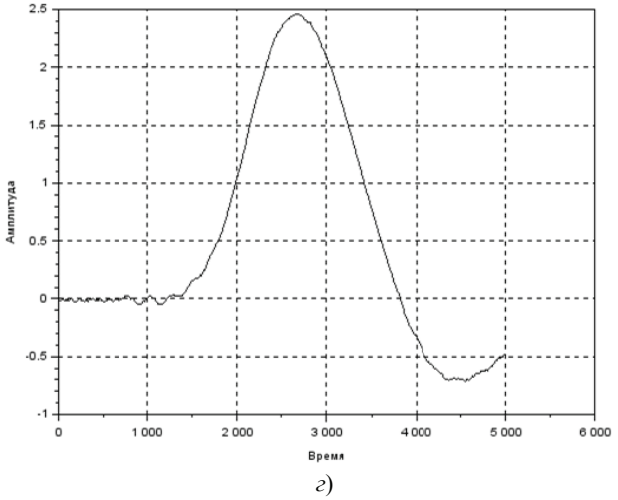
Рис. 4. Отфильтрованный сигнал феррозонда фильтром Баттерворта 3 порядка (начало)



б)



в)



г)

Рис. 4. Отфильтрованные сигналы феррозонда фильтром Чебышева 1 3 порядка (*б*), фильтром Чебышева 2 3 порядка (*в*) и эллиптическим фильтром 3 порядка (*г*) (окончание)

Заключение

Наличие помех аналогового сигнала приводит к неустойчивой работе младшего разряда аналого-цифрового преобразователя. Для снижения помех сигналов феррозонда необходимо согласовывать амплитуду сигнала феррозонда и входные характеристики аналого-цифрового преобразователя. Для снижения помех оцифрованного сигнала феррозонда реально применение цифровых фильтров. Цифровые фильтры Баттерворта, Чебышева и Кауэра одного порядка снижают уровень помех примерно на одном уровне. Повышение порядка фильтра незначительно влияет на уровень помех.

Список литературы

1. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю. В. Афанасьев, Н. В. Студенцов, В. Н. Хорев, Е. Н. Чечурина, А. П. Щелкин. – Ленинград : Энергия, 1979. – 320 с.

2. 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.

3. Болдырев, В. Т. Устройство для измерения напряженности магнитного поля / В. Т. Болдырев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 1. – С. 86–87.

4. Алексеев, Е. Р. Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова, Е. А. Рудченко. – Москва : ALT Linux ; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с.

Digital Processing of Fluxgate Sensor Output Signals

© V. D. Shapovalov[1], V. P. Kucher[1] ✉, V. S. Bezkorovayny[2]

[1] *Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, vkucher86@mail.ru;*
[2] *Department of Electromechanics, Vladimir Dahl Lugansk State University, Lugansk, Russian Federation*

Keywords: signal processing; fluxgate sensor; Butterworth filter; Chebyshev filter; digital signal; digital filter; elliptic filter.

Abstract: Methods for the digital processing of signals from fluxgate sensors are presented. The causes of output signal distortion due to noise and interference are examined; so is the impact of the ratio between signal amplitude and the analog-to-digital converter input range on digitization quality. The performance of Butterworth, Chebyshev, and elliptic digital filters is compared using the SciLab simulation environment. Improvements in measurement accuracy and reliability resulting from reduced noise levels and enhanced digitized signal quality are demonstrated.

References

1. Afanasyev Yu.V., Studentsov N.V., Khorev V.N., Chechurina E.N., Shchelkin A.P. *Sredstva izmereniy parametrov magnitnogo polya* [Instruments for Measuring Magnetic Field Parameters], Leningrad: Energiya, 1979,320 p. (In Russ.)

2. Baranova V.E. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Tomsk, 2015, 18 p. (In Russ.)

3. Boldyrev V.T. [Device for measuring magnetic field strength], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 1, pp. 86-87. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Alekseev E.R., Chesnokova O.V., Rudchenko E.A. *Scilab: Resheniye inzhenernykh i matematicheskikh zadach* [Scilab: Solving Engineering and Mathematical Problems], Moscow: ALT Linux; BINOM. Knowledge Laboratory, 2008, 260 p. (In Russ.).

Digitale Verarbeitung der Ausgangssignale von Ferrosonden

Zusammenfassung: Es sind Methoden zur digitalen Verarbeitung von Ferrosonden-Sensoren vorgestellt. Die Ursachen von Signalverzerrungen durch Rauschen und Störungen sowie der Einfluss des Verhältnisses von Signalamplitude zu Eingangsspannungsbereich des Analog-Digital-Wandlers auf die Digitalisierungsqualität sind betrachtet. Die Effektivität von Butterworth-, Chebyshev- und elliptischen Digitalfiltern ist in der SciLab-Modellierungsumgebung verglichen. Durch die Reduzierung des Rauschpegels und die Verbesserung der Qualität des digitalisierten Signals ist eine höhere Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit erzielt.

Traitement numérique des signaux de sortie des ferrosondes

Résumé: Sont présentées les méthodes du traitement numérique du signal des capteurs ferrosondes. Sont examinées les causes de la distorsion du signal de sortie par le bruit et les interférences, l'influence du rapport d'amplitude du signal et de la plage d'entrée du convertisseur analogique-numérique sur la qualité de la numérisation. Est présentée une comparaison de l'efficacité des filtres numériques de Butterworth, de Chebychev et delui elliptique dans le cadre de la modélisation SciLab. Est démontrée une amélioration de l'exactitude et de la fiabilité des mesures grâce à la réduction du niveau de bruit et à l'amélioration de la qualité du signal numérisé.

Авторы: ***Кучер Василий Павлович*** – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»; ***Шаповалов Валентин Дмитриевич*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»; ***Безкоровайный Владимир Сергеевич*** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электромеханика», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Российская Федерация.