

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-757.6

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-5-68-72



Устройство детектирования ферромагнитных тел в подающем тракте кормоуборочных комбайнов на базе датчика Холла

*Вернези Мирослав Анатольевич, аспирант*slavikvernezi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7950-8816>*Лукьянов Александр Дмитриевич, канд. техн. наук*alexlukjanov1998@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>*Вернези Екатерина Александровна[✉], магистрант*katrinrosse99@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-3318-7839>

Донской государственный технический университет; 344002, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Аннотация. Принцип действия существующих металлодетекторов кормоуборочных комбайнов, находящихся в зоне уборки, основан на регистрации и обработке сигнала с датчиков, реагирующих на изменение статической энергии магнитного поля, вызванного движением ферромагнитных тел в зоне действия магнитного поля. Система, базирующаяся на методе измерения электродвижущей силы индуктивных чувствительных элементов, не удовлетворяет современным требованиям по уровню чувствительности. Авторами рассмотрена возможность применения в роли чувствительных элементов датчиков магнитного поля на основе эффекта Холла. С учётом геометрических особенностей системы каждый чувствительный элемент размещается таким образом, чтобы магнитное поле, создаваемое двумя соседними магнитами, располагалось перпендикулярно плоскости чувствительного элемента. При этом чувствительные элементы устанавливаются в плоскостях, ориентированных под разными углами относительно направления подачи урожая. Ферромагнитный объект, проходя через поле обнаружения, изменяет напряжённость магнитного поля на одном или нескольких чувствительных элементах, и датчик на основе эффекта Холла выдаёт напряжение, прямо пропорциональное величине магнитного поля. После обработки генерируется сигнал для остановки подающих валков. Эффективная обработка сигнала в режиме реального времени положительно сказывается на скорости реакции на инородное тело в питателе машины.

Ключевые слова: металлодетектор, комбайн, датчик Холла, напряжённость магнитного поля, аналоговый фильтр, датчик магнитного поля

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда: проект № 075-03-2022-283/8 (FZNE-2022-0005)

Формат цитирования: Вернези М.А., Лукьянов А.Д., Вернези Е.А. Устройство детектирования ферромагнитных тел в подающем тракте кормоуборочной сельскохозяйственной техники на базе датчика Холла // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 5. С. 68-72. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-68-72>.

© Вернези М.А., Лукьянов А.Д., Вернези Е.А., 2023

ORIGINAL PAPER

Device for detecting ferromagnetic bodies in the feed path of forage harvesting machinery based on the Hall sensor

*Miroslav A. Vernezi, postgraduate student*slavikvernezi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7950-8816>*Aleksandr D. Lukyanov, CSc (Eng), Head of the Department*alexlukjanov1998@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3827-6569>*Ekaterina A. Vernezi[✉], MSc student*katrinrosse99@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-3318-7839>

Don State Technical University; 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation

Abstract. The operation principle of metal detectors used in forage harvesting equipment operating in the harvested area is based on the registration and processing of a signal from sensors that respond to changes in the static

magnetic field caused by the movement of ferromagnetic bodies in the area of the magnetic field. The systems based on measuring coils do not meet modern requirements for the level of sensitivity. The authors consider a possibility of using magnetic field sensors based on the Hall effect as sensitive elements. Taking into account the geometric features of the system, each sensing element must be positioned in such a way that the magnetic field generated by two adjacent magnets is perpendicular to the plane of the sensing element. Under this design, the sensitive elements should be located in planes oriented at different angles relative to the direction of the crop supply. When a ferromagnetic object passes through the detection field, it changes the magnetic field density on one or more sensing elements, and the Hall effect sensor outputs a voltage directly proportional to the magnitude of the magnetic field. This signal is processed, after which another signal is generated to stop the feed rolls. Efficient real-time signal processing has a positive effect on the speed of response to a foreign body in the machine feeder.

Keywords: metal detector, forage harvester, Hall sensor, magnetic field strength, analog filter, magnetically induced signals, magnetic field sensor

Funding. The research was carried out under the grant from the Russian Science Foundation (project No. 075-03-2022-283/8 (FZNE-2022-0005))

For citation: Vernezi M.A., Lukyanov A.D., Vernezi E.A. Device for detecting ferromagnetic bodies in the feed path of forage harvesting machinery based on the Hall sensor. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2023;25(5):68-72. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-68-72>.

Введение. В сельскохозяйственной отрасли системы детектирования металлических объектов нашли широкое применение на конвейерных лентах во время проведения технологических этапов производства, а также в зерноуборочных комбайнах. Современные технические решения задачи детектирования металлических объектов на пути следования кормоуборочной сельскохозяйственной техники базируются на трудах К.Л. Беннетта и К.Э. Боумена¹. Принцип работы основан на аналоговой обработке сигнала, наведённого на измерительные катушки во время изменения напряжённости магнитного поля. Аналоговый фильтр отсекает шумы, и на выходе преобладает лишь полезный сигнал [1]. Настройка таких систем заключается в нахождении компромисса между минимальным количеством ложных срабатываний системы и обеспечением максимально возможной чувствительности [2]. Но кормоуборочный комбайн имеет в своём составе большое количество деталей, вращающихся с различной частотой, поэтому производится условная фильтрация². Множество механических элементов, движущихся с меняющейся скоростью и ускорением, способствует возникновению псевдопериодических техноиндуцированных шумов высокой интенсивности, накладывающих ограничение на применение классических методов обработки. Вариативность характеристик помехи обуславливает невозможность спроектировать аналоговые фильтры, эф-

фективно фильтрующие сигнал от техноиндуцированных помех во всём диапазоне частот вращения вальцов комбайна. Более того, в целях минимизации ложных срабатываний системы параметры аналоговых фильтров выбираются с достаточно широким диапазоном фильтрации, что в свою очередь приводит к значительному ослаблению полезного сигнала. Это было подтверждено в ходе детального анализа одной из таких систем. Ситуация усугубляется конструктивными особенностями самих вальцов, в которых располагается датчик, а именно: наличие в них сварного шва превращает аустенитную сталь в ферромагнетик [3]. В связи с этим соотношение «Полезный сигнал/шум» принимает недостаточную величину, чем объясняется неудовлетворительная по сегодняшним меркам чувствительность системы. Также известна система, работающая по принципу детектирования вихревых токов [4]. Достоинством метода является возможность обнаружения также объектов из цветных металлов, недостатком – малое расстояние обнаружения и экранирование детектора металлической стенкой вальца.

Цель исследований: разработка системы обнаружения ферромагнитных тел для кормоуборочной сельскохозяйственной техники на основе датчика Холла с большей чувствительностью, компактностью и меньшей стоимостью по сравнению с современными эксплуатируемыми системами.

Материалы и методы. С целью увеличения чувствительности и селективности системы металлодетектирования кормоуборочных комбайнов проработана концепция по замене чувствительного элемента системы с измерительных катушек на датчик магнитного поля (датчик Холла) в методе, описанном

¹ Беннетт К.Л., Боумен К.Э. Speed independent static field metal detector: patent US3972156, 1976. (A 01 D69/10)

² Bruschini C. A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining. PhD thesis, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 2002.

в патенте № US3972156¹. В роли чувствительного элемента выбран датчик АН3503, обладающий компактными размерами, достаточной чувствительностью и высокими показателями соотношения «Сигнал/шум».

Результаты и их обсуждение. Предложена схема расположения датчиков Холла и магнитов внутри вальца (рис. 1).

Монтажная рама с датчиками металлодетектора устанавливается на неподвижном валу нижнего подающего вальца³ и может быть изготовлена из чёрного металла (рис. 1). Рама служит для жёсткого закрепления магнитов и чувствительных элементов относительно машины. Могут применяться как электромагниты, так и постоянные магниты. Их количество может варьироваться в зависимости от области применения. Магниты располагаются в два ряда поперёк пути подачи собираемой массы. Магниты одного ряда имеют северный полюс, а магниты второго ряда – южный полюс.

Согласно теории эффекта Холла при протекании электрического тока через чувствительный элемент, помещённый в магнитное поле перпендикулярно его плоскости, в плоскости чувствительного элемента создаётся электрическое поле в направлении, перпендикулярном протеканию тока, при этом напряжённость электрического поля пропорциональна напряжённости магнитного поля. Поэтому магниты устанавливаются так, что линии магнитного потока располагаются между магнитами одного ряда и двумя ближайшими к нему магнитами второго ряда. Каждый датчик размещается таким образом, что его чувствительный элемент перехватывает линии потока, проходящие между северным полюсом магнита в одном ряду и южным полюсом – в другом ряду. Каждый чувствительный элемент располагается в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного потока, проходящим через него. В случае насыщения чувствительных элементов угол плоскости, в которой расположены элементы, смещается. Чувствительные элементы ориентируются таким образом, чтобы их плоскости были перпендикулярными пути подачи урожая.

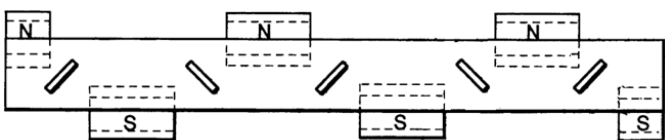


Рис. 1. Схема расположения датчиков и магнитов в вальце

Fig. 1. Arrangement of sensors and magnets in the roller

Расположенные таким образом магниты создают статическое магнитное поле, простирающееся в канал подачи урожая (поперёк него). Поле обнаружения содержит множество магнитных полей, простирающихся между нижними и верхними магнитами. Каждое поле из их множества имеет линии потока, проходящие через датчик в направлении, перпендикулярном плоскости расположенного в нем чувствительного элемента Холла. Таким образом, когда ферромагнитное тело, встречаемое на пути подачи урожая, проходит через одно или множество магнитных полей, плотность потока в чувствительных элементах изменяется, и они генерируют выходные сигналы.

Для проведения испытаний разработано устройство обработки сигналов с датчика Холла (рис. 2).

При работе устройства сигнал с датчика 1 проходит этап дифференциального усиления 2 с целью выделения полезного сигнала и подавления синфазных помех, возникающих в результате вращения механических узлов самого комбайна. Для устранения помех сигнал проходит через каскад фильтрации низких частот 3. Подготовленный сигнал несёт в себе исключительно полезный сигнал, превышение заданного уровня которого приводит к срабатыванию гистерезисного компаратора 4, который в свою очередь выдаёт сигнал на электромагнитное реле останова 5, что приводит к немедленному останову подающих валцов. Разработана и реализована принципиальная электрическая схема блока усиления и фильтрации, структура которой представлена на рисунке 3.

Изменение величины магнитного поля производится датчиком Холла 1. Дифференциальный усилитель 2 реализован на инструментальном усилителе. Повторитель 3, также реализованный на инструментальном усилителе, с источником опорного

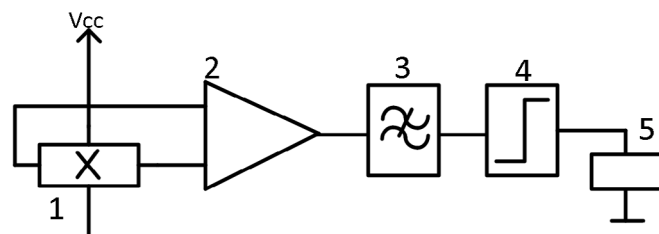


Рис. 2. Структурная схема системы металлодетектирования:

- 1 – датчик Холла АН3503; 2 – усилитель;
- 3 – фильтр низких частот; 4 – компаратор гистерезиса;
- 5 – электромагнитное реле для замыкания цепи останова валцов

Fig. 2. Block diagram of the metal detection system:

- 1 – Hall sensor AN3503; 2 – amplifier;
- 3 – low-pass filter; 4 – hysteresis comparator;
- 5 – electromagnetic relay for closing the roller stop circuit

³ Bohman С.Е. Metal detector apparatus: patent US4433528A, 1982.

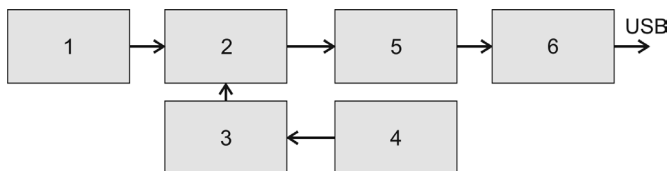


Рис. 3. Структура принципиальной электрической схемы блока обработки сигналов с датчиков Холла:

- 1 – датчик Холла; 2 – дифференциальный усилитель;
3 – масштабирующий инструментальный усилитель;
4 – источник опорного напряжения; 5 – ФНЧ Чебышева;
6 – микроконтроллер

Fig.3. Structure of the circuit diagram of the block for processing signals from Hall sensors:

- 1 – Hall sensor; 2 – differential amplifier;
3 – scaling instrumentation amplifier,
4 – reference voltage source;
5 – Chebyshev low-pass filter, 6 – microcontroller

напряжения на 2,5 В 4 задаёт уровень смещения выходного сигнала дифференциального усилителя. Для фильтрации сигнала спроектирован фильтр Чебышева 5, обладающий наиболее высокой крутизной спада АЧХ [5]. Запись сигнала производилась с помощью микроконтроллера 6 (STM32F103C8T6) в составе отладочной платы Blue Pill. Контроллер содержит 12-битный аналого-цифровой преобразователь с программируемой частотой выборки. Передача данных на компьютер осуществляется через интерфейс USB. Для сохранения данных было разработано ПО на языке Python, осуществляющее приём данных (значение напряжений с датчика и бит оптического датчика) и записывающее их в текстовый файл. Файл данных открывается в среде Matlab для последующего анализа.

Разработка и испытание системы производились на специализированном стенде с высокой степенью повторяемости ключевых условий реальной работы комбайна. С целью идентификации полезного сигнала в массиве данных стенд оснащён датчиком пролёта ферромагнитного груза, закрепленным на гибком подвесе. Факт пролёта груза фиксируется специальным оптическим датчиком. Схема проведения испытаний представлена на рисунке 4.

В результате получен массив данных со значениями выходного сигнала при вращении вальца, а также при пролете мимо него ферромагнитного тела. Визуализация результатов измерений представлена на рисунке 5.

Из графика рисунка 5 следует, что амплитуда сигнала от каждого пролёта груза в значительной степени превышает шумовой сигнал. Сигнал аналогичен результатам, представленным в [6]. С таким

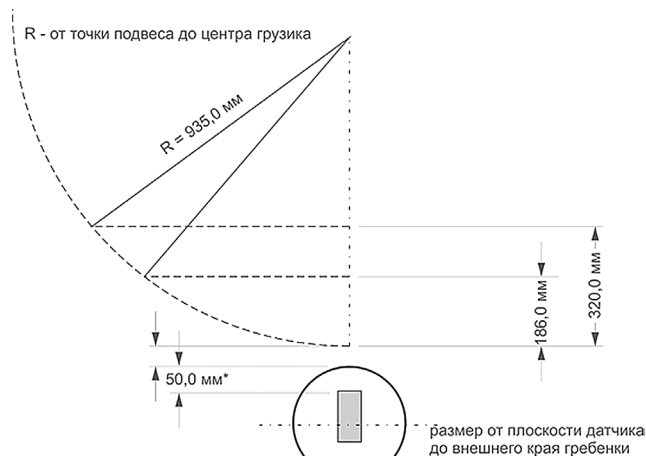


Рис. 4. Схема проведения испытаний

Fig.4. Testing scheme

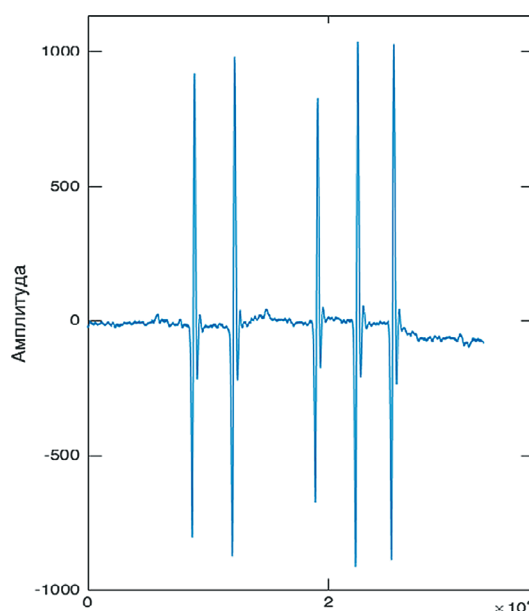


Рис. 5. График выходного сигнала с блока обработки сигнала с датчиков

Fig. 5. Graph of the output signal from the sensor signal processing unit

соотношением «Сигнал/шум» данная система способна обеспечить высокую чувствительность при минимальном количестве ложных срабатываний.

Выводы

Представленное устройство детектирования ферромагнитных тел отличается от существующих на сегодняшний день высокими показателями соотношения «Сигнал/шум», высокой чувствительностью, меньшими габаритными размерами, а также более низкой себестоимостью. Это дает основание рекомендовать его при проектировании систем металлодетектирования сельскохозяйственной техники.

Список использованной литературы

1. Долин А.Ю., Мещеряков И.К., Ремизов С.Е., Смирнов Б.Н. Металлодетектор для кормоуборочного комбайна: патент RU2060625 C1, IPC A01D75/18. Заяв. № 93001978/15, опублик. 27.05.1996. EDN: LINHQQ
2. Ripka P., Janosek M., Novacek P. Depth estimation of metal objects. *Procedia Engineering*. 2010;5:280-283. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.102>
3. Быков А.Б., Томчук В.В., Лозин Д.А., Джус Н.И., Джус И.Н. Металлодетектор уборочного комбайна и способ выявления ферромагнитного тела (его варианты): Патент RU2245560C2, МПК G01R33/02 G01V 3/08; заяв. № 2001112747/09 от 14.05.2001; Опублик. 27.01.2005. EDN: ZOOIFF
4. Jizhong Wang, Yangchun Liu, Bo Zhao, Fengzhu Wang, Weipeng Zhang, Yang Li. Design and verification of metal foreign body detection device for harvester based on eddy current effect. *Journal of the ASABE*. 2023,66(1):55-64. <https://doi.org/10.13031/ja.15185>
5. Будуннова К.А., Кравченко В.Ф. Математические методы синтеза частотно-избирательных фильтров // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11. № 1(43). С. 2-21. END: EIDOPW
6. Novacek P., Rohac J., Ripka P. Complex markers for a mine detector. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2012;48(4):1489-1492. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172933>

Вклад авторов

А.Д. Лукьянов – концептуализация, окончательная доработка и редактирование рукописи
 М.А. Вернези – создание лабораторного макета, проведение экспериментальных исследований, создание начального варианта текста
 Е.А. Вернези – обработка результатов экспериментов, визуализация результатов, патентный поиск

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 28.03.2023; после рецензирования и доработки 08.10.2023, принята к публикации 08.10.2023

References

1. Dolin A.Yu., Meshcheryakov I.K., Remizov S.E., Smirnov B.N. Metal detector for a forage harvester: Patent RU2060625 C1, IPC A01D75/18. No 93001978/15, 1996. (In Rus.)
2. Ripka P., Janosek M., Novacek P. Depth estimation of metal objects. *Procedia Engineering*. 2010;5:280-283. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.102>
3. Bykov A.B., Tomchuk V.V., Lozin D.A., Juice N.I., Juice I.N. Metal detector of a harvester and a method for detecting a ferromagnetic body (its variants): Patent No. 2245560C2 RF, IPC G01R33/02 G01V3/08, No. 2001112747/09 Applied on May 14, 2001; published on January 27, 2005. (In Rus.)
4. Jizhong Wang, Yangchun Liu, Bo Zhao Show et. all. Design and Verification of Metal Foreign Body Detection Device for Harvester Based on Eddy Current Effect. *Journal of the ASABE*. 2023;66(1):55-64. <https://doi.org/10.13031/ja.15185>
5. Budunova K.A., Kravchenko V.F. Mathematical methods for the synthesis of frequency-selective filters. *Physical Bases of Instrumentation*. 2022;11(1):2-21. (In Rus.)
6. Novacek P., Rohac J., Ripka P. Complex markers for a mine detector. *IEEE Transactions on Magnetism*. 2012;48(4):1489-1492. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2011.2172933>

Authors' contribution

A.D. Lukyanov – conceptualization, draft finalizing and editing
 M.A. Vernezi – designing the laboratory model, experimental study, original draft preparation
 E.A. Vernezi – processing of experimental results, visualization, patent search

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 23.03.2023; revised 08.10.2023; accepted 08.10.2023