

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОЭРЦИТИВНОГО СПЕКТРОМЕТРА

М.М. Чупин, Р.Р. Латыпов

Казанский федеральный университет, Казань, Россия  
grey2paul@gmail.com

## UPGRADING THE SYSTEM FOR CONTROLLING AND PROCESSING DATA FROM THE COERCIVITY SPECTROMETER

M.M. Chupin, R.R. Latipov

Kazan Federal University, Kazan, Russia  
grey2paul@gmail.com

**Аннотация.** Целью данного проекта является обновление системы управления и блока сбора данных коэрцитивного спектрометра на современной элементной базе. Усовершенствование системы управления позволит улучшить качество обнаружения полезного сигнала, повысить соотношение сигнал-шум, упростить труд оператора системы и практически полностью автоматизировать систему получения и обработки конечных результатов спектрометра.

**Ключевые слова:** коэрцитивный спектрометр, исследование шумов, намагниченность, математические методы обработки, геофизические данные.

**Abstract.** The aim of this project is modernization of control system and data gathering block of coercivity spectrometer based on modern analog and digital elements. Control system upgrade leads to improvement of signal detection quality and increase of signal-to-noise ratio. Therefore, system operator's job would be simplified and complex of receiving and processing final data would be completely automatic.

**Keywords:** coercivity spectrometer, noise investigation, magnetization, mathematical processing methods, geophysical data.

### ВВЕДЕНИЕ

Коэрцитивный спектрометр — устройство, относящееся к области магнитных измерений и предназначенное для изучения магнитного гистерезиса индуктивной и остаточной намагниченностей, коэрцитивных спектров и магнитного последствия различных твердых, сыпучих и вязко-пластичных веществ, в том числе горных пород и промышленных материалов в области геологии, геофизики, экологии, а также в области исследования новых веществ и материалов [Бузов и др., 1981].

### СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Принцип действия коэрцитивного спектрометра основывается на пошаговом намагничивании образцов исследуемых веществ с малым приращением поля на каждый шаг, что позволяет считать процессы намагничивания и перемагничивания практически непрерывными [Бузов и др., 1986].

Снятие измерений с устройства автоматизировано и позволяет получать информацию о характеристиках вещества с незначительным участием оператора. Основным элементом прибора является, вращающийся с постоянной угловой скоростью, диаманитный диск с держателем образцов. Данный диск позволяет провести измерение индуктивной намагниченности исследуемого образца за счет внесения его в магнитное поле. Также производится измерение остаточной намагниченности, вынося образец из поля. Магнитное поле создается электромагнитом, индуктивная и остаточная намагниченность измеряется при помощи индукционных датчиков, расположенных последовательно, через четверть оборота диска измерительной системы. Датчик измерений индуктивной намагниченности ( $J_i$ ) разме-

щен между полюсами электромагнита, а датчик остаточной намагниченности ( $J_r$ ) помещен в многослойный пермалловый экран [Нурғалиев, Ясонов, 2009]. Изменение тока в катушках датчиков усиливается и фильтруется на аппаратном уровне, после чего сигналы поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя и передаются в управляющую программу на персональном компьютере.

Статистически значимые результаты измерений с использованием коэрцитивного спектрометра могут быть получены в непродолжительные промежутки времени за счет высокой производительности и степени автоматизации прибора.

Магнитное поле, создаваемое электромагнитом, изменяется после каждого оборота диска, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, что позволяет строить зависимости вектора намагничивания и вектора напряженности магнитного поля для широкого спектра веществ — от диамагнетиков и парамагнетиков до веществ с достаточно большими концентрациями ферромагнитных примесей (магматических пород) [Iassonov et al., 1998]. Первоначально, в качестве основного контроллера, управляющего спектрометром, использовался контроллер фирмы Silicon Labs на основе микросхемы C8051F060. Достоинствами контроллера являются: два независимых 16-битных канала АЦП, низкое энергопотребление, большое количество периферии, достаточное для полноценной работы спектрометра. Но один из недостатков данного чипа — это невысокая пропускная способность канала связи, приводящая к неустойчивой связи с управляющим компьютером через используемый виртуальный COM порт, прикрепленный к физическому интерфейсу USB.

Последующая замена микросхемы C8051F060 на микроконтроллер фирмы STMicroelectronics

STM32F407, использующий 32-разрядное ядро ARM Cortex-M4, позволило решить данную проблему, т. к. в составе STM32F407 содержится возможность работы с USB как конечного устройства. Так же высокая частота тактирования и скорость выполнения команд микроконтроллером STM32F407 позволило без ущерба производительности пересылать данные непрерывным потоком за все время проведения эксперимента, что открыло новые возможности в обработке полученных экспериментальных результатов.

Но возможность бесперебойной передачи данных на управляющий компьютер, таким образом, была решена только со стороны контроллера. Большинство распространенных современных операционных систем не имеют возможности работать в режиме реального времени и, при использовании относительно маломощных компьютеров, происходит потеря части данных, пересылаемых контроллером по интерфейсу USB. Предпринятым решением было организованность накопление данных за полный цикл работы коэрцитивного спектрометра с последующей передачей сохраненных данных по завершению работы на компьютер, после чего проводить обработку полученных данных. Минусом такого подхода является заметное увеличение времени работы устройства и не особо большое количество флеш-памяти контроллера, что в свою очередь вносит ограничения в работоспособность спектрометра.

Микроконтроллер STM32F407 так же имеет в своем составе три 12 разрядных канала аналого-цифровых преобразователя, два из которых используются для преобразования данных, поступающих с датчиков прямой и остаточной намагниченностей, в цифровой вид, и два канала 12 разрядных цифро-аналоговых преобразователя, один из которых используется для управления напряженностью электромагнитного поля. Сигнал с выхода датчиков индуктивной и остаточной намагниченностей имеет амплитуду порядка нВ, вследствие чего необходимо использовать усилительный каскад с последующей фильтрацией низких и высоких частот. Но после усиления, из-за небольшой разрядности внутренних аналого-цифровых преобразователей контроллера и соответствующего динамического диапазона АЦП, возникает необходимость в добавлении блока переключаемых аттенюаторов для выбора необходимого делителя, в зависимости от магнитной силы того или иного образца. В свою очередь добавление переключаемого каскада аттенюаторов усложняет процесс управления и вносит дополнительные шумы в исходный сигнал с датчиков. Так же однополярность внутренних АЦП контроллера создает необходимость в добавлении постоянной составляющей в исходный сигнал, что приводит к добавлению в схему сбора данных дополнительного операционного усилителя, тем самым еще больше зашумляя полезный сигнал.

Используя внутренний 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь STM32F407 для пошагового намагничивания электромагнита, не удастся провести измерения с необходимой точностью в приращении электромагнитного поля, что так же является одной из проблем блока управления коэрцитивного спектрометра. Однополярность внутрен-

него цифро-аналогового преобразователя контроллера подразумевает добавление дополнительного мультиплексора, посредством которого осуществляется смена полярности электромагнита.

Учитывая все недостатки последней версии блока управления и блока сбора данных коэрцитивного спектрометра, было предложено решение — спроектировать новую плату, объединив блоки управления и сбора данных спектрометра, а также написать новое программное обеспечение [Чупин и др., 2017].

В качестве решения проблемы нехватки динамического диапазона внутренних 12-ти разрядных аналого-цифровых преобразователей последовательного приближения контроллера STM32F7, было предложено разместить на плате управления и сбора данных два канала высокочастотных 24 разрядных сигма-дельта АЦП ads127101 фирмы Texas Instruments, комбинирующих в себе широкую входную пропускную способность, высокую скорость и производительность динамического диапазона на 160 дБ при частоте дискретизации в 250 кГц.

В контексте передачи данных на управляющий компьютер, было предложено решение перенести процесс обработки данных непосредственно в контроллер. Обработывая контроллером данные, полученные с индукционных датчиков, и передавая на компьютер готовые для построения графиков значения индуктивной намагниченности и остаточной намагниченности образцов, удалось сократить количество передаваемой информации примерно в сто пятьдесят раз и тем самым увеличить временное окно между отправкой пакетов с готовыми результатами. Такое решение позволяет операционным системам, не работающим в режиме реального времени без потерь успевать принимать все передаваемые данные.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы было показано, что модернизация системы сбора данных коэрцитивного спектрометра, путем замены использовавшихся 12-разрядных аналого-цифровых преобразователей на более современные 24-разрядные АЦП, повысил динамический диапазон в 1.5 раза, что в свою очередь позволило проводить измерения любых образцов без использования блока переключаемых аттенюаторов, понижая шум и упрощая управление системы. Также данная модернизация позволила повысить точность проводимых измерений.

Аппаратная модернизация системы управления (замена использовавшегося 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя на 20-разрядный двухполярный ЦАП) позволила увеличить количество ступеней пошагового намагничивания электромагнита и позволит в дальнейшем ликвидировать блок переключения полярности электромагнита.

Программная модернизация системы управления, заключающаяся в полном переносе обработки полученных результатов в контроллер STM32F407, решила главную проблему предыдущей версии устройства, связанную с потерей данных при их передаче на компьютер, уменьшив объем передаваемой информации за полный цикл работы в 150 раз и увеличив временное окно между пакетами.

Также было показано, что используя современный метод обработки данных на основе вейвлет-преобразования, можно полностью автоматизировать процесс выделения полезного сигнала на фоне шумов близких в спектральной области и соотношении сигнал-шум, близком к единице. Проведя сравнение данного метода обработки данных с классическим, были получены средние значения коэффициентов пропорциональности методов. Они составили 1.0389 для датчика индуктивной намагниченности и 1.0011 для датчика остаточной намагниченности. Проведенные измерения показали хорошее соответствие методов, которое в дальнейшем необходимо подтвердить в сериях контрольных экспериментов. Применение предлагаемого метода позволит улучшить качество обнаружения полезного сигнала и повысить соотношение сигнал-шум.

Добавление беспроводного Bluetooth канала передачи данных позволяет отображать готовые результаты на мобильных устройствах и планшетах, открыв новые возможности в управлении коэрцитивным спектрометром и упростив работу оператора в полевых условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Коэрцитивный спектрометр // Авторское свидетельство № 851293. 1981. опубл. в Б.И. № 28.
- Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во КГУ, 1986. 167 с.
- Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Полезная модель «Коэрцитивный спектрометр» № 81805 от 22.09.2009.
- Чупин М.М., Кириллов Р.С., Латыпов Р.Р. и др. Разработка программно-аппаратной части коэрцитивного спектрометра // Диагностика естественных неоднородных сред и математическое моделирование. БШФФ-2017. Иркутск. 2017. С. 226–227.
- Iassonov P.G., Nourgaliev D.K., Bourov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // *Geologica Carpathica*. 1998. V. 49, N 3. P. 224–226.