

*А. А. Леуткин<sup>1\*</sup>, Б. Ф. Симонов<sup>1</sup>, А. О. Кордубайло<sup>1</sup>*

## **Электронная система обнаружения крайних положений бойка электромагнитного молота**

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрена проблема управления рабочим циклом скважинного виброисточника, созданного на базе электромагнитного молота. Питание молота виброисточника ранее осуществлялось по двум кабелям: силовому и сигнальному. Предложен метод управления на основе математического анализа токов катушек молота, позволяющий определять моменты прохождения бойка мимо полюсов электромагнитов и осуществлять коммутацию катушек. Для повышения надёжности в условиях низкой стабильности рабочих электрических параметров виброисточника, применяются методы адаптивного управления. В работе описан промышленный образец созданного устройства, проходящий испытания совместно с виброисточником. Применение разработанного устройства позволит снизить стоимость всего комплекса оборудования, а также повысить технологичность работ по вибровоздействию. Кроме того, технологии, реализованные в устройстве, позволяют применять его совместно с наземными электромагнитными молотами различного назначения, что упрощает их конструкцию.

**Ключевые слова:** скважинный виброисточник, электромагнитный молот, математический анализ, адаптивное управление, микроконтроллер, импульс тока

*А. А. Leutkin<sup>1\*</sup>, B. F. Simonov<sup>1</sup>, A. O. Kurdubaylo<sup>1</sup>*

## **Electronic System for Detecting the Extreme Positions of the Electromagnetic Hammer Striker**

<sup>1</sup> Chinacal Institute of Mining Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: leutkin-alexandr@rambler.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of controlling the operating cycle of a downhole vibration source created on the basis of an electromagnetic hammer. The vibration source hammer was previously powered via two cables: power and signal. A control method is proposed based on mathematical analysis of the currents of the hammer coils, which makes it possible to determine the moments when the striker passes past the poles of electromagnets and to switch the coils. To increase reliability in conditions of low stability of the operating electrical parameters of the vibration source, adaptive control methods are used. The work describes an industrial prototype of the created device, which is being tested together with a vibration source. The use of the developed device will reduce the cost of the entire complex of equipment, as well as increase the manufacturability of vibration impact work. In addition, the technologies implemented in the device allow it to be used in conjunction with ground-based electromagnetic hammers for various purposes, which simplifies their design.

**Keywords:** downhole vibration source, electromagnetic hammer, mathematical analysis, adaptive control, microcontroller, current pulse

## ***Введение***

Традиционные методы извлечения нефти из пласта позволяют добыть не более 30-40% всего объёма ресурсов месторождения. Кроме того, с начала 60-х гг. XX века на многих разведанных месторождениях в СССР и за рубежом наметилась тенденция к снижению дебита скважин в результате кальмотации перфорационных отверстий обсадных колонн и призабойной зоны пласта. Эти факторы привели к активизации научных и опытно-промышленных работ по созданию и развитию методов увеличения нефтеотдачи (МУН) [1, 2]. Разработаны тепловые, физико-химические, биологические, гидроимпульсные МУН [3, 4, 5]. Одним из наиболее универсальных и экологичных физико-химических МУН является вибровоздействие на нефтяной пласт [6, 7]. В конце 80-х гг. XX века специалистами ИГД СО РАН были разработаны и испытаны наземные виброисточники, показавшие высокую эффективность вибровоздействия. Однако такие виброисточники имели большие массу, габариты и энергоёмкость. Кроме того, большая глубина залегания пласта приводила к значительному рассеянию энергии сейсмических волн в горных породах. Следующим этапом стала разработка скважинных виброисточников, размещаемых в скважине на уровне пласта. Это позволяет воздействовать непосредственно на нефтесодержащие породы пласта. Такое устройство было создано в ИГД СО РАН в 2019 г. на базе электромагнитного молота и гидравлических силовых элементов, преобразующих энергию от вертикального перемещения бойка молота в радиальные усилия, передаваемые на обсадную колонну скважины [8, 9, 10]. Промысловые испытания скважинного виброисточника, проведённые в 2023 г., показали существенный недостаток конструкции: подключение виброисточника к системе питания и управления (СПУ), размещаемой на поверхности, осуществляется двумя кабелями. Силовой кабель используется для питания катушек молота. По сигнальному кабелю в СПУ выводятся импульсы напряжения от датчиков крайних положений бойка молота. Получая эти импульсы, СПУ переключает катушки, обеспечивая возвратно-поступательное движение бойка и работу виброисточника.

Использование сигнального кабеля в составе виброисточника усложняет его монтаж и герметизацию в скважине, увеличивает стоимость всего комплекса оборудования и снижает надёжность конструкции. В связи с этим было принято решение отказаться от использования датчиков крайних положений бойка и создать устройство, с высокой точностью определяющее моменты переключения катушек на основе математического анализа их рабочих токов.

## ***Методы и материалы***

На рисунке 1 представлены осциллограммы токов катушек молота.

Импульс тока можно условно разделить на четыре участка. Участок 1 соответствует отсутствию тока в катушке в отключенном состоянии. На участке 2 происходит переходный процесс включения катушки и начала движения бойка под действием её магнитного поля. Участок 3 соответствует рабочему ходу бойка. Форма тока на этом участке может быть различной: постоянный ток, линейно

спадающий или возрастающий, пульсирующий с постоянной составляющей и т.д. Смена формы тока может произойти спонтанно во время хода бойка. На участке 4 происходит торможение бойка. При этом ток плавно нарастает до установившегося значения, соответствующего статическому состоянию молота. Нарастание тока на этом участке происходит медленнее, чем при переходном процессе на участке 2. Именно участок 4 является рабочим для электронной системы отслеживания (далее ЭСО) крайних положений бойка. Для определения участка 4 используется цифровой математический анализ тока катушки [11], позволяющий оценить скорость нарастания тока и выдать СПУ сигнал на переключение катушек.

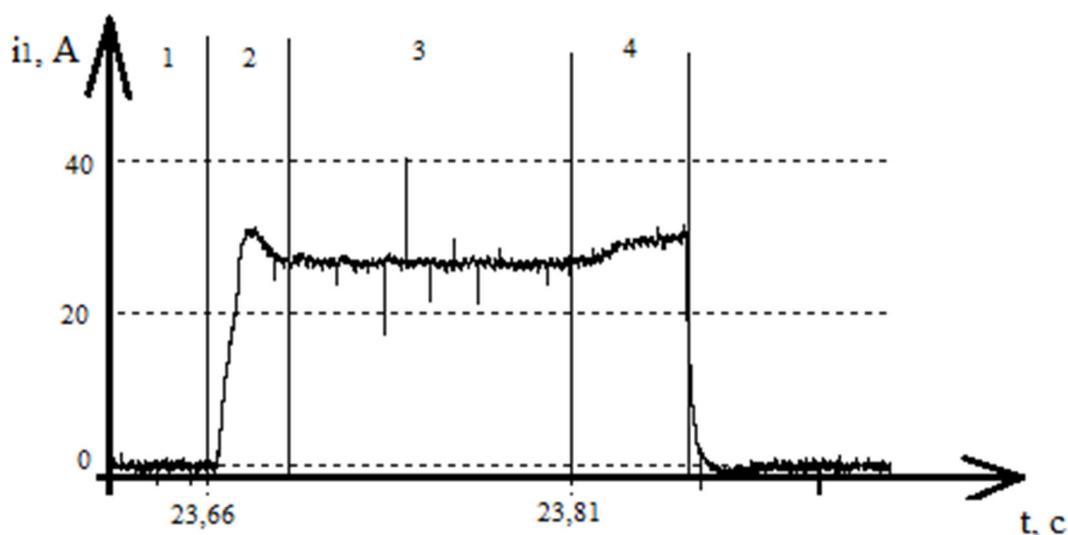


Рис. 1. Импульс тока катушки молота

При работе виброисточника, ЭСО располагается на поверхности, рядом с СПУ, в дальнейшем оно будет интегрировано в его состав. Внутреннее устройство ЭСО показано на рисунке 2.

Для обеспечения своевременного срабатывания ЭСО применена технология адаптивного управления [15, 16]. Микроконтроллер (МК) непрерывно отслеживает ток обеих катушек. При включении одной из них, МК, обнаружив ток в линии, оценивает его форму и величину. На основе этого МК принимает решение о методе поиска рабочего участка: обнаружение порога срабатывания, поиск минимального значения тока перед нарастанием либо прямое вычисление скорости нарастания. Кроме того, информация о величине тока применяется для оценки минимально возможного времени движения бойка. Это предохраняет ЭСО от ложных срабатываний.

Во избежание перегрева, виброисточник работает с перерывами. Типовой режим - 3 минуты работы и 7 минут охлаждения. Как только ЭСО обнаруживает период охлаждения по одновременному отсутствию тока в обеих катушках, происходит автоматический перезапуск.

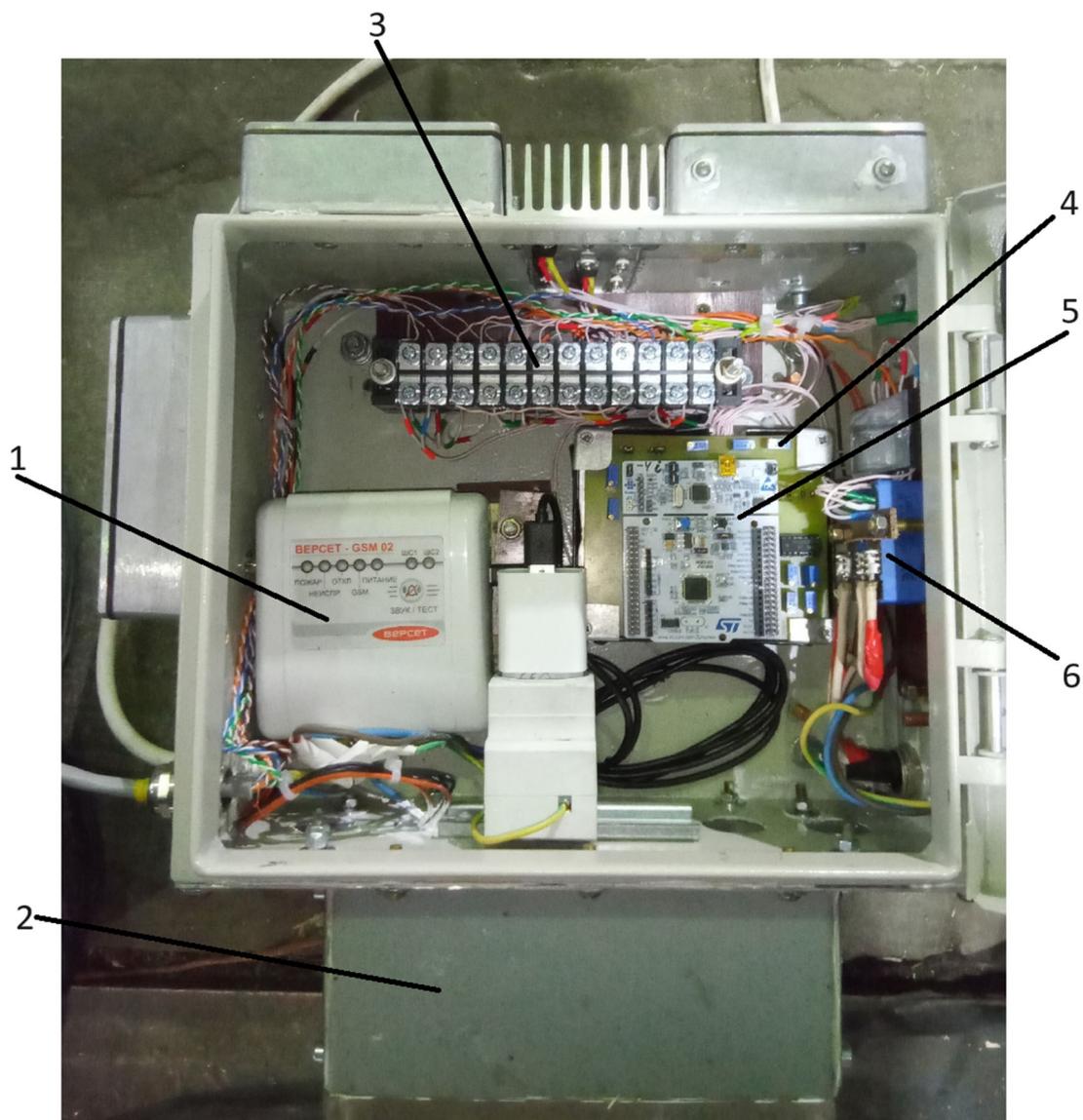


Рис. 2. Внутреннее устройство ЭСО: 1 – прибор доставки SMS-сообщений для дистанционного наблюдения за работой ЭСО; 2 – экранирующий корпус трансформатора; 3 – клеммная колодка, позволяющая конфигурировать ЭСО для выполнения разнообразных задач; 4 – главная плата со схемой предварительного усилителя, расширяющего диапазон рабочих токов ЭСО; 5 – плата микроконтроллера; 6 – датчики тока

Отдельное внимание уделено защите ЭСО от электромагнитных помех различного рода [17, 18] и механических воздействий. Все системы питания выполнены на линейных стабилизаторах напряжения LM317 [19]. Компоненты ЭСО размещены в стальном заземлённом корпусе со степенью защиты IP66. Вся незадействованная площадь медного покрытия печатных плат также заземлена. Трансформатор питания экранирован от остального объёма корпуса ЭСО. Для подавления пульсаций сигналов с предварительного усилителя используется цифровая фильтрация в программе МК [20].

## Результаты

Осциллограммы рабочих токов виброисточника приведены на рисунке 3.

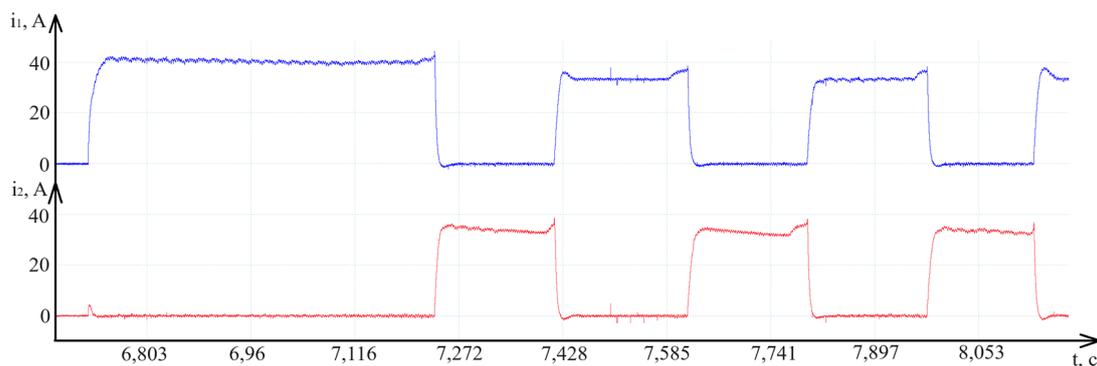


Рис. 3. Осциллограммы токов катушек виброисточника. Верхний график – ток верхней катушки, нижний график – ток нижней катушки

При испытаниях установлено, что система работает надёжно и не зависит от формы токов, безошибочно определяя участки срабатывания. ЭСО прошла промышленные испытания совместно с виброисточником на Урмышлинском месторождении летом 2023 г. и показала высокие результаты, обеспечив длительную работу виброисточника.

Технические решения, заложенные в программу МК, позволяют использовать ЭСО для управления работой строительных молотов. Боёк такого молота наносит удар по жёсткой свае или инструменту, поэтому ток катушки рабочего хода имеет короткий участок плавного нарастания. Первичные испытания ЭСО проводились на имитационной модели электромагнитного молота с катушками рабочего и обратного хода и упругим отбойником. Фотография стенда приведена на рисунке 4.



Рис. 4. Стенд с моделью электромагнитного молота

Осциллограммы работы приведены на рисунке 5. Исследования проводились с жёсткой и упругой наковальней.

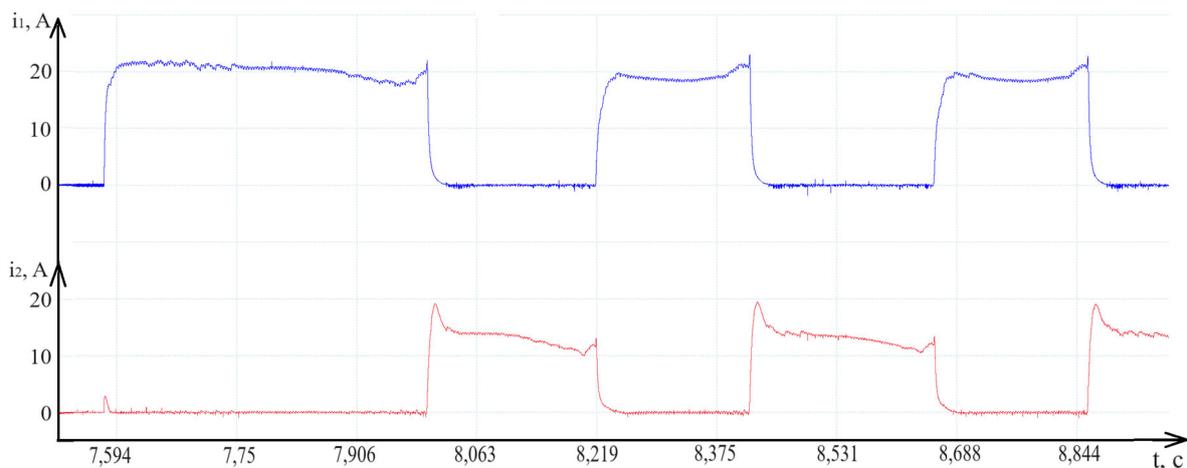


Рис. 5. Осциллограммы токов катушек модели молота. Верхний график – ток верхней катушки, нижний график – ток нижней катушки. Осциллограммы сняты при работе с упругой наковальней.

Отслеживание величины тока позволяет увеличить гибкость использования ЭСО. Например, ЭСО длительное время работала с молотом скважинного виброисточника с токами катушек 25-30 А. Требуется использовать её для управления работой небольшого строительного молота с рабочими токами 15-20 А. Для этого достаточно встроить силовые входы датчиков тока ЭСО в линии питания катушек молота, а также подключить импульсные выходы ЭСО к СПУ молота. Более никаких настроек не требуется. Для работы с более крупными молотами, имеющими рабочие токи 50-70 А, необходимо настроить вычитаемый сигнал в токовом усилителе. При этом ЭСО может работать с любыми токами.

### *Обсуждение*

Применение ЭСО совместно с виброисточником позволяет повысить точность переключения катушек, в отличие от индуктивных датчиков положения, использованных в исходной конструкции молота. Кроме того, работа ЭСО более соответствует динамике молота, что позволяет добиться малого дрейфа частоты ударов.

### *Заключение*

Разработано и в промышленных условиях испытано устройство, позволяющее осуществлять переключение катушек электромагнитного молота без использования датчиков положения бойка. Применение устройства позволяет повысить надёжность, эффективность и технологичность применения электромагнитных молотов. Несмотря на то, что изначально устройство разработано для работы со скважинным виброисточником, его можно применять также с электромагнитными молотами различного назначения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 639 с.
2. Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N. Status of polymer-flooding technology, *J. Can. Petr. Technol.*, 2015, Vol.54, Issue 2. – P. 116 – 126.
3. Bera A. and Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review, *Applied Energy*, 2015, Vol. 151. – P. 206 – 226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D., and Degre G. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR*, 2014. – P. 566 – 596.
5. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., and Norouzbeigi R. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery, *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, 2015, Vol. 26. – P. 1294 – 1303.
6. Дыбленко В.П., Марчуков Е.Ю., Туфанов И.А. и др. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с рудноизвлекаемыми запасами. – М.: РАЕН, 2012. – 344 с.
7. Симонов Б. Ф., Чередников Е. Н., Сердюков С. В. и др. Технология объёмного волнового воздействия на нефтегазовые залежи для повышения углеводородоотдачи пластов // *Нефтяное хозяйство*. – 1998. – № 4. – С. 42 – 44.
8. Симонов Б. Ф., Опарин В. Н., Кордубайло А. О., Востриков В. И. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника // *ГИАБ*. – 2019. – № 8. – С. 180 – 189.
9. Кордубайло А. О., Симонов Б. Ф. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2020. – №5 – С.146–153.
10. Пат. 2642199 Российская Федерация, МПК E21B23/01 (2006.01). Скважинный сейсмоисточник / Б. Ф. Симонов, Ю. В. Погарский, А. О. Кордубайло, Ю. А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ПАО «СилэнСейсмоимпульс»; заявл. 19.04.2017; опубл. 24.01.2018; Бюл. № 3. – 11 с.: ил.
11. Баховцев И. А. Микропроцессорные системы силовой электроники // *Новосибирск*. – 2021. – 230 с.
12. К. Титце. Полупроводниковая схемотехника / К. Титце, У. Шенк. – М.: Мир, 1982 г.
13. П. Хоровиц Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Бином. – 2019 г. – 704 с.: ил.
14. Б. Картер Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини. – М.: Додэка, 2011 г. – 544 с.: ил.
15. Мартинович М. В. Математическое моделирование устройств и систем. – Новосибирск: НГТУ, 2021 г. – 150 с.
16. Мартинович М. В. Силовая электроника для возобновляемой энергетики. – Новосибирск: НГТУ, 2022 г. – 180 с.
17. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. 4-ое изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 636 с.: ил.
18. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. – М.: СОЛОН-Пресс, 2020. – 416 с.: ил.
19. Коробков Д. В. Основы преобразовательной техники // *Новосибирск*. – 2020. – 90 с.
20. Oppenheim Alan V. Discrete-time signal processing / Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, with John R. Buck. – 2nd ed., 1999.

© А. А. Леуткин, Б. Ф. Симонов, А. О. Кордубайло, 2024