

# РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ФЕРРИТНОЙ ФАЗЫ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Мальцева В.Е., Волегов А.С.*

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

[viktoria.maltseva@urfu.ru](mailto:viktoria.maltseva@urfu.ru), [alexey.volegov@urfu.ru](mailto:alexey.volegov@urfu.ru)

**Аннотация.** Измерение магнитных характеристик различных материалов представляет все больший практический интерес как с точки зрения использования материалов в качестве функциональных, так и конструкционных. Для измерения свойств магнитотвердых материалов в замкнутой магнитной цепи собирается измерительная система и разрабатывается программное обеспечение. Результатом является установка, позволяющая измерять зависимость свойств магнитных материалов от различных параметров.

**Ключевые слова:** измерительная установка, программное обеспечение, магнитные характеристики материалов, замкнутая магнитная цепь.

## DEVELOPMENT OF SETUP FOR MEASURING MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS IN A CLOSED MAGNETIC CIRCUIT

*Maltseva V., Volegov A.*

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

**Abstract.** Measurement of magnetic characteristics of different materials is of increasing practical interest both in terms of the use of materials as functional and structural. To measure the properties of magnetically hard materials in a closed magnetic circuit assembled installation and developed software. The result is a setup that allows measuring the dependence of the properties of magnetic materials on various parameters.

**Key words:** Measurements, setup, software, magnetic characteristics of materials, closed magnetic circuit.

### **Введение**

Магнитные гистерезисные свойства материалов определяются как их химическим и фазовым составом, так и микроструктурным состоянием. С одной стороны, направленное изменение микроструктуры материала позволяет варьировать его магнитные свойства и использовать такие материалы в качестве

функциональных, с другой стороны, механические свойства материалов могут быть оценены исходя из знания химического состава и магнитных свойств. Применение магнитных материалов и изделий из них в современных устройствах требует высокой точности измерений магнитных свойств первых. Функциональные магнитные материалы нашли применение в энергетике, ВПК, космической технике, бытовых приборах и устройствах и др. Конструкционные материалы, широко применяемые в различных отраслях, включая атомную энергетику, газо- и нефтедобычу, транспорт, так же должны проходить неразрушающий контроль, в том числе, магнитными методами [1]. В нержавеющей аустенитных сталях и сварочных материалах важным показателем качества является содержание ферритной фазы. Феррит может оказывать как благотворное влияние, например, предотвращать появление горячих трещин, так и отрицательное, охрупчивать сварочный материал при высоких температурах, снижать ударную вязкость при криогенных температурах. Поэтому, количество ферритной фазы строго контролируется [2].

В настоящее время, российская промышленность не выпускает средства измерений и контроля магнитных свойств материалов в замкнутой магнитной цепи. Импортное оборудование, предназначенное для таких измерений, имеет закрытое программное обеспечение, что затрудняет испытание и поверку магнитоизмерительных установок и комплексов поэлементно. Частично проблема решается применением стандартных образцов утвержденного типа.

Целью настоящей работы является разработка установки, предназначенной для измерения магнитных свойств образцов магнитомягких и магнитотвердых материалов в замкнутой магнитной цепи, с обеспечением прослеживаемости до ГЭТ 198-2017 [3].

### **Эксперимент**

Для измерения магнитных свойств материалов была собрана измерительная система, состоящая из тесламетра FH-54, флюксметра EF-5, электромагнита, измерительных катушек для измерений намагниченности ( $J$ ) и напряженности магнитного поля ( $H$ ), блока питания, схемы переключения полярности, персонального компьютера.

На рисунках 1 и 2 представлены внешний вид и блок-схема измерительной системы.



Рисунок 1 – Система для измерения петель магнитного гистерезиса

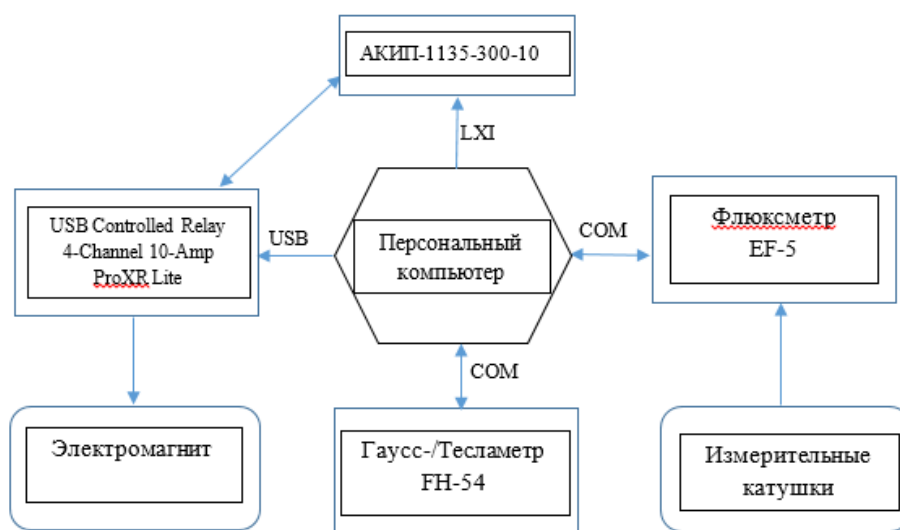


Рисунок 2 – Блок-диаграмма измерительной системы

Для измерения напряженности магнитного поля используется тесламетр FH-54 [4], который соединен с компьютером через COM-порт. Так же, с помощью COM-порта происходит передача результатов измерений магнитного потока с флюксметра EF-5 [5] на компьютер. Кроме того, флюксметр проводом МГТФ соединен с измерительными катушками. Блок питания АКИП-1135-300-10 соединен с компьютером посредством интерфейса LXI. Блок питания соединен с управляющими реле USB Controlled Relay 4-Channel 10-Amp ProXR Lite с компьютером через USB-порт, а также соединены с электромагнитом.

Микросхема с управляющими реле при достижении определенных значений переключает направление измерения напряженности магнитного поля.

Одной из поставленных задач стояла разработка программного обеспечения в среде LabVIEW для измерительной установки. Результатом является программа, позволяющая измерять зависимость потокосцепления от напряженности магнитного поля.

### Результаты и обсуждение

В качестве проверки работоспособности ПО и собранной установки проводились измерения различных групп образцов.

На первом этапе в качестве образца был выбран цилиндр ( $d_{\text{поперечного сечения}} = 10\text{мм}$ ) постоянного магнита системы Nd-Fe-B материала. Результаты измерений представлены на рисунке 3.

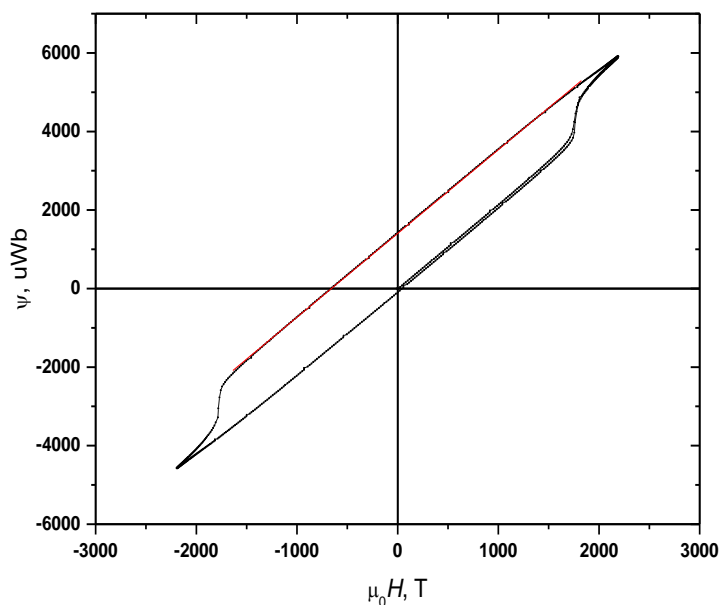


Рисунок 3 – Измеренная петля гистерезиса

Затем была поставлена задача: полученные данные зависимости  $\Phi(H)$  преобразовать к зависимости  $J(H)$ , чтобы в дальнейшем добиться улучшения программного обеспечения гистерезисграфа путем измерения других зависимостей (не только  $\Phi(H)$ ).

В ходе преобразований была получена формула, связывающая величину магнитного потока, пронизывающего образец, и намагниченность образца.

$$J = \frac{\Phi - N(S_1 + S_2)H}{4\pi\mu_0 S_2 N}$$

где  $\Phi$  – величина магнитного потока,  $N$ –число витков катушки измерительной катушки,  $S_1$  – площадь поперечного сечения магнитотвёрдого

образца,  $S_2$  – площадь поперечного сечения катушки,  $H$  – напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита.

После пересчёта измеренных данных по формуле, петля гистерезиса приняла вид, отличающийся от первоначального (рисунок 4).

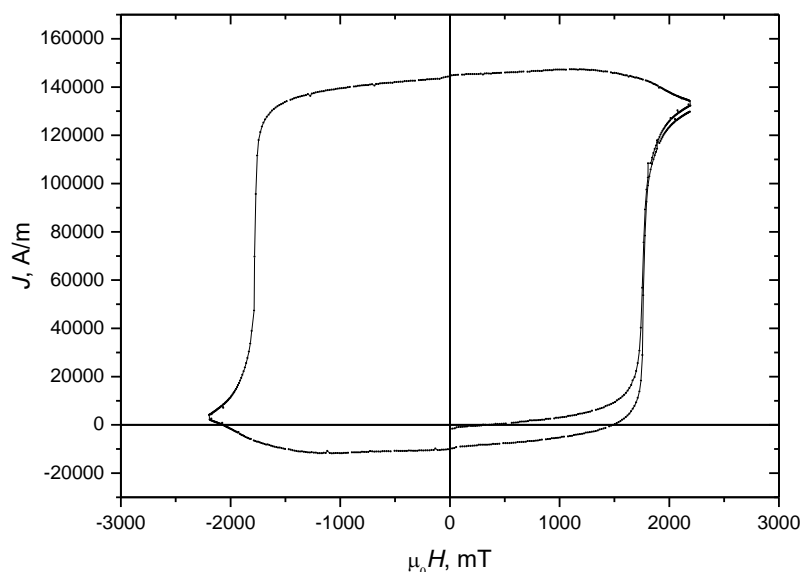


Рисунок 4 – Петля гистерезиса Nd-Fe-B

В следующем этапе работы в УНИИМе была произведена замена одной из составляющих частей гистерезисграфа, а именно – электромагнита с целью измерения образцов больших размеров.

После замены электромагнита была проверена универсальность разработанного программного обеспечения на предмет работоспособности программы в условиях изменения оборудования, проведены измерения другой группы образцов, а именно – полученных методом центробежного литья. Проводились измерения и последующая обработка данных с целью получения процентного содержания ферритной фазы в представленных на измерения образцах. Анализируя полученные значения СФФ можно сделать вывод о высокой степени прецизионности и точности результатов измерений.

### **Заключение**

Разработана магнитоизмерительная система, предназначенная для измерения магнитных гистерезисных свойств образцов ферро- и ферримагнитных материалов с плоскопараллельными поверхностями в замкнутой магнитной цепи. Для автоматизации проведения измерений разработано программное обеспечение в графической среде LabVIEW.

Проведены измерения петель магнитного гистерезиса нескольких групп образцов, представленных на исследования. Определено процентное содержание ферритной фазы в образцах.

Проведена оценка случайной составляющей погрешности определения содержания ферритной фазы. Указанная погрешность не превышает 5%.

На этом совершенствование ПО и собранной измерительной системы не заканчивается: планируется включить в состав измерительной установки дополнительный флюксметр EF5, который будет использован для демонстрации эквивалентности результатов измерений при использовании датчика Холла и неохватывающей катушки в качестве датчиков напряженности магнитного поля, появится возможность автоматического расчета магнитных гистерезисных свойств магнитотвёрдых материалов в замкнутой магнитной цепи.

### **Список литературы**

1. Мальцева В.Е., Волегова Е.А., Волегов А.С. Разработка установки для измерения магнитных свойств материалов в замкнутой магнитной цепи // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2019 – Тез. докл. VI Междунар. молодеж. науч. конф., УрФУ – Екатеринбург, 2019. – С. 319, 320.

2. Волченко В. Н., Ямпольский В. М. Сварка и свариваемые материалы. Том 2 (3). Технология и оборудование. Издательство МГТУ им. НЭ Баумана //М.: Москва. – 1996.

3. Волегова Е. А. и др. Государственный первичный эталон единиц мощности магнитных потерь, магнитной индукции постоянного магнитного поля в диапазоне от 0,1 до 2,5 Тл и магнитного потока в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  Вб ГЭТ 198–2017 //Измерительная техника. – 2018. – №. 3. – С. 7-10.

4. Dr. Erich Steingroever. Инструкция по эксплуатации. FH-54(Гаусс-/Тесламетр). – MAGNET-PHYSIK GmbH, Köln ,2006. – 47с.

5. Dr. Erich Steingroever. Инструкция по эксплуатации. Электронный флюксметр EF-5. MAGNET-PHYSIK GmbH, Köln. – 59с.