

К. А. Аверина<sup>1</sup>, С. В. Пахомов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

**Аннотация.** В работе предлагается способ и устройство для определения магнитных свойств конструкционных сталей. Представлена экспериментальная установка. Проанализированы наиболее используемые аналитические выражения для описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса и подробно рассмотрены две математических модели с использованием арктангенсовых функций и функцией Ланжевена. Основным требованием при построении модели является достаточная в каждом конкретном случае точность и простота описания основной кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса во всем диапазоне изменения перемагничивающего поля.

**Ключевые слова:** способ, устройство, намагничивание, математическая модель, петля гистерезиса.

К. А. Averina<sup>1</sup>, S. V. Pakhomov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk state University of railway engineering, Irkutsk, Russian Federation

## DETERMINATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS OF FERROMAGNETIC MATERIALS ACCORDING TO THE RESULTS OF THE HYSTERESIS LOOP

**Abstract.** The paper proposes a method and a device for determining the magnetic properties of structural steels. The experimental setup is presented. The most used analytical expressions for the description of the main magnetization curve and magnetic hysteresis loops are analyzed and two mathematical models using arctangent functions and Langevin function are considered in detail. The main requirement in the construction of the model is sufficient in each case, the accuracy and simplicity of the description of the main magnetization curve and magnetic hysteresis loops in the entire range of changes of the magnetic field.

**Keywords:** method, device, magnetization, mathematical model, hysteresis loop.

### Введение

Магнитный вид неразрушающего контроля относится к одному из первых видов контроля, который стал использоваться для диагностики продукции и промышленных объектов [4, 5]. По характеру взаимодействия физического поля с объектом диагностирования данный вид контроля однотипен т. е. во всех случаях используют процесс намагничивания объекта и измерения его параметров, которые заранее определены и замеряются при контроле. Известно, что любой процесс намагничивания или перемагничивания ферромагнитного материала сопровождается возникновением гистерезиса, по петле которой можно определять структуру и химический состав материала объекта, определять наличие несплошностей и других свойств [1, 2, 3].

При данном методе можно выявлять многие опасные дефекты, такие как закаты, волосовины, закалочные, шлифовочные и усталостные трещины, а также другие поверхностные дефекты на поверхности объекта, ширина раскрытия которых достигает несколько микрометров.

Магнитные методы контроля в большинстве случаев имеют большое практическое преимущество по сравнению с другими методами, так как они очень просты и осуществляются с большой скоростью, очень чувствительны ко всяким изменениям структуры материала объекта и применяются без нарушения форм объекта.

Сейчас на практике магнитные измерения применяются для:

- определения магнитных свойств материалов объектов;
- суждения по величине свойств материалов объектов о структурно-фазовом состоянии, внутренних и приложенных напряжениях, наличии различного рода дефектов и т.д.

Магнитные методы структурно-фазового анализа достаточно давно и широко применяются специалистами в промышленности, но в последние годы наметились пути по дальнейшему качественному развитию и разработке новых методов контроля объектов. Это происходит в двух направлениях исследований.

Первое – это поиск новых контролируемых параметров на объекте, а также исследование и разработка новых методик и измерительных преобразователей, которые позволяют производить измерения физических характеристик.

Второе – это использование одновременно нескольких физических характеристик в качестве контролируемых параметров. В настоящее время в зависимости от конкретных задач контроля, марки материала, а также требуемой производительности метода такими контролируемыми параметрами являются [1, 2]:

- магнитная намагниченность;
- магнитная индукция;
- магнитная проницаемость;
- магнитная напряженность;
- коэрцитивная сила;
- эффект Баркгаузена.

Применение таких многопараметровых методов контроля обеспечивают высокую информативность для диагностирования и получать достоверную оценку состояния материалов объекта. Однако, следует отметить, чтобы их реализовать, необходимы такие устройства или новые приборы, которые позволят с достаточной точностью определять необходимый комплекс контролируемых параметров и, по возможности, будут обладать мобильностью, простотой и удобством измерений, возможностью оцифровки, компьютерной обработки и сохранения результатов измерений.

Хочется указать на то, что применение магнитного вида неразрушающего контроля обычно заключается в определенной степени сложности измерений параметров и в дальнейшем кропотливой работы по анализу полученных результатов. В первую очередь, это касается в необходимости определять магнитные характеристики не тела объекта, а его состав вещества. Это обычно применимо только для объектов простой формы и объектов малых размеров. Для крупногабаритных объектов, а также имеющих сложную форму объектов определение магнитных свойств вещества возможно только с использованием приставных преобразователей, т. е. составных магнитных цепей.

На практике отмечаются и негативные моменты при применении магнитных методов контроля, связанные с тем, что затруднено из-за загрязнения поверхности изделий проведение магнитных измерений, наличие большой шероховатости поверхности, которая приводит к искажению результатов контроля параметров, и наличие различных, мешающих контролю, немагнитных покрытий на объектах. Кроме того, в случае появления зазора в составной замкнутой магнитной цепи возникают существенные погрешности в результаты измерений магнитных свойств вещества объекта.

Следовательно, как показывают исследования, проведенные в последнее время, возникает необходимость в получении и разработке новых методик и диагностических средств локального и бесконтактного определения магнитных характеристик вещества объекта, чтобы затем производить анализ физико-механических свойств объектов контроля.

Применение магнитных методов контроля очень широко применяются специалистами на железнодорожном транспорте. Современные методы позволяют обнаруживать поверхностные дефекты на объектах на их грубых поверхностях с минимальной глубиной выявляемых дефектов до трехкратной высоты шероховатостей поверхности.

В процессе сканирования поверхности объекта магнитные методы широко применяют для контроля цилиндрических объектов и для контроля произведенных сварных швов.

Кроме того, с помощью магнитных методов контроля наиболее часто определяют толщину немагнитных покрытий на магнитной основе, толщину стенок объектов из магнитных и немагнитных материалов, что позволяет контролировать основные геометрические параметры объектов.

Рассмотрим процесс улучшения измеряемых характеристик объектов, произведенных магнитным дефектоскопом.

#### Методика проведения исследований

Для проведения исследований была предложена методика, позволяющая путем внедрения программного обеспечения в дефектоскоп улучшать характеристики, в первую очередь коэрцитивную силу, остаточную намагниченность, индукцию, определяющихся петлей гистерезиса образцов стали [6].

При этом была использована модифицированная версия осциллографического метода [7], учитывающая специфические особенности регистрации измеряемого сигнала, а именно:

– ЭДС самоиндукции измерительной катушки, которая непосредственно регистрируется осциллографом;

– введение в систему программирования MATLAB в цифровом формате файл информации. Он содержит отсчеты времени и напряжения. Следует отметить, что интегрирование сигнала ЭДС измерительной катушки производится численным методом, поэтому в созданной системе не требуется введение поправочных коэффициентов и систем калибровки. Образованный интеграл позволяет определить абсолютное значение магнитного потока. В традиционной схеме осциллографического метода исключена интегрирующая RC цепь.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

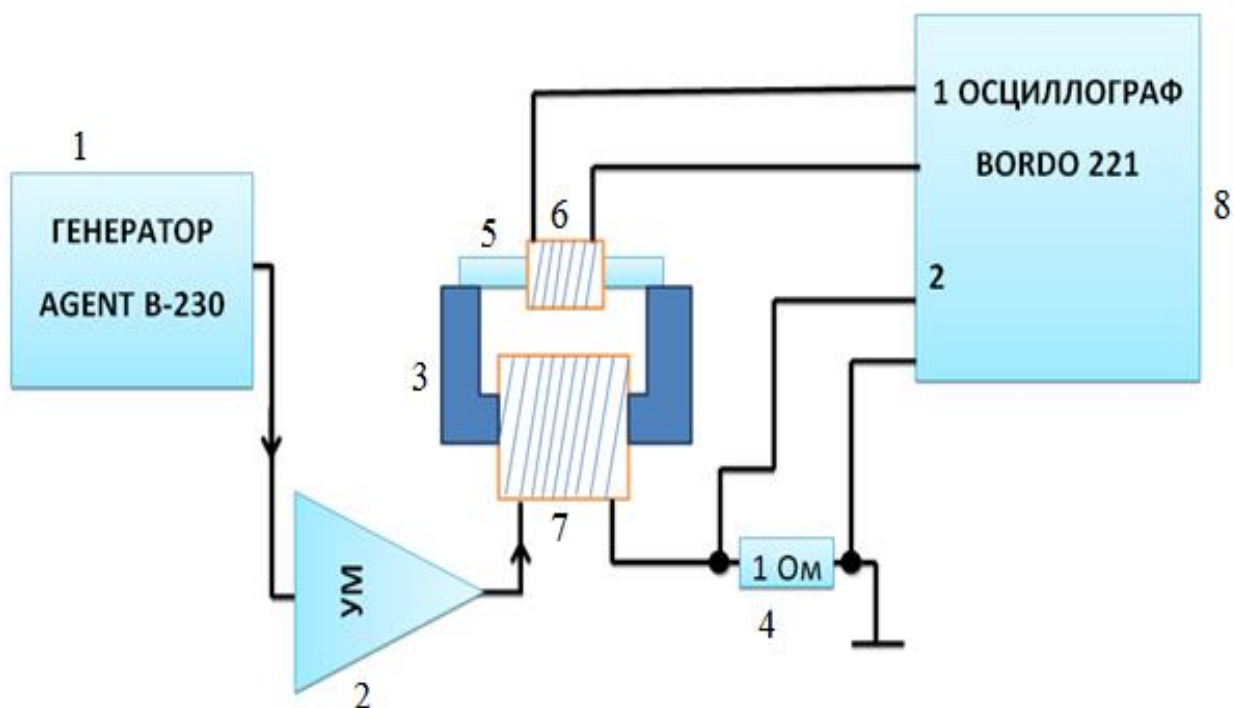


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки

Установка (рис. 1) включает в себя следующие блоки:

- 1 – генератор AGENTB-230;
- 2 – усилитель мощности;
- 3 – основной сердечник;

- 4 – резистор;
- 5 – измеряемый образец;
- 6 – измерительная катушка;
- 7 – катушка намагничивания;
- 8 – осциллограф BORDO 221.

Заданное намагничивание основного сердечника 3 генератора 1 осуществляет усилитель мощности 2. Обычно на генераторе 1, как показывают исследования, задается частота в диапазоне частот от 2-10 Гц. Было предусмотрено поддерживать вид сигнала или синусоидальный или треугольный, при этом амплитуда сигнала всегда соответствовала 1-3 В.

Обеспечение необходимого тока в катушку намагничивания 7 осуществляет усилитель мощности 2. С целью определения сигнала тока последовательно с катушкой намагничивания 7 включен резистор 4, величина которого соответствует 1 Ом. При таком расположении используемых устройств получаемое напряжение при таком сопротивлении образует сигнал, который оказывается пропорциональным току через катушку намагничивания 7. Данный сигнал подается на второй вход осциллографа 8.

Поступивший сигнал на измеряемый образец 5 производит замыкание магнитной цепи. На образце 5 установлена измерительная катушка 6, состоящая из 100 витков. Используемая измерительная катушка 6 подает сигналы на первый вход осциллографа 8, где и фиксируется выходной сигнал.

В качестве объекта исследования использовались образцы сталей №№ 133 и 245, показанные на рис. 2,а и рис. 2,б соответственно.

При исследовании на экране ПЭВМ высвечивались сначала реальные, а затем с использованием установки и усовершенствованные петли гистерезиса. В дальнейшем результаты анализировались и делались выводы.

Следует отметить, что для исследования были выбраны 35 образцов стали различных видов и размеров.

В результате исследований, в качестве примера, на рис. 3 показан один из результатов измерения петли гистерезиса для стали образца № 133, а на рис. 4 – для стали образца № 245.

Проанализируем полученные результаты.

В процессе измерения контролируемых параметров получили для образца № 133 (рис. 2,а) следующие их значения:

- коэрцитивная сила составляет 4800 Н/м;
- насыщение 1,25 Тл (рис. 3).

Проделав тоже самое для образца № 245 (рис. 2,б) были получены следующие результаты: коэрцитивная сила составляет 2600 Н/м, а насыщение 1,30 Тл (рис. 4).



а)



б)

Рис. 2. Примерные используемые при эксперименте стальные образцы: а - № 133, б - № 245

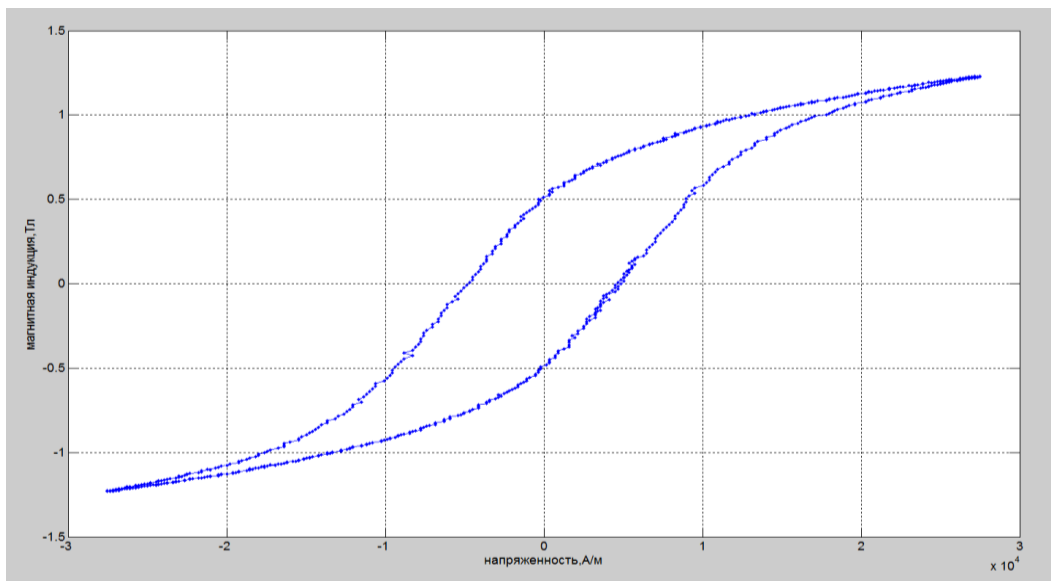


Рис. 3. Полученная петля гистерезиса для стали образца № 133 без программного обеспечения

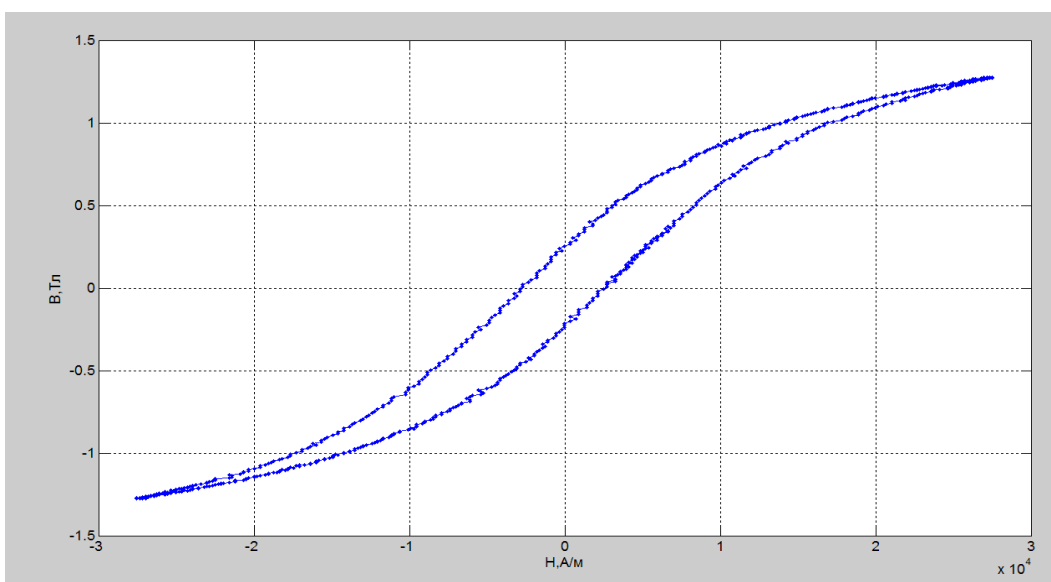


Рис. 4. Полученная петля гистерезиса для стали образца № 245 без программного обеспечения

### Результаты исследований

В дальнейшем при эксперименте подключалась программная разработка.

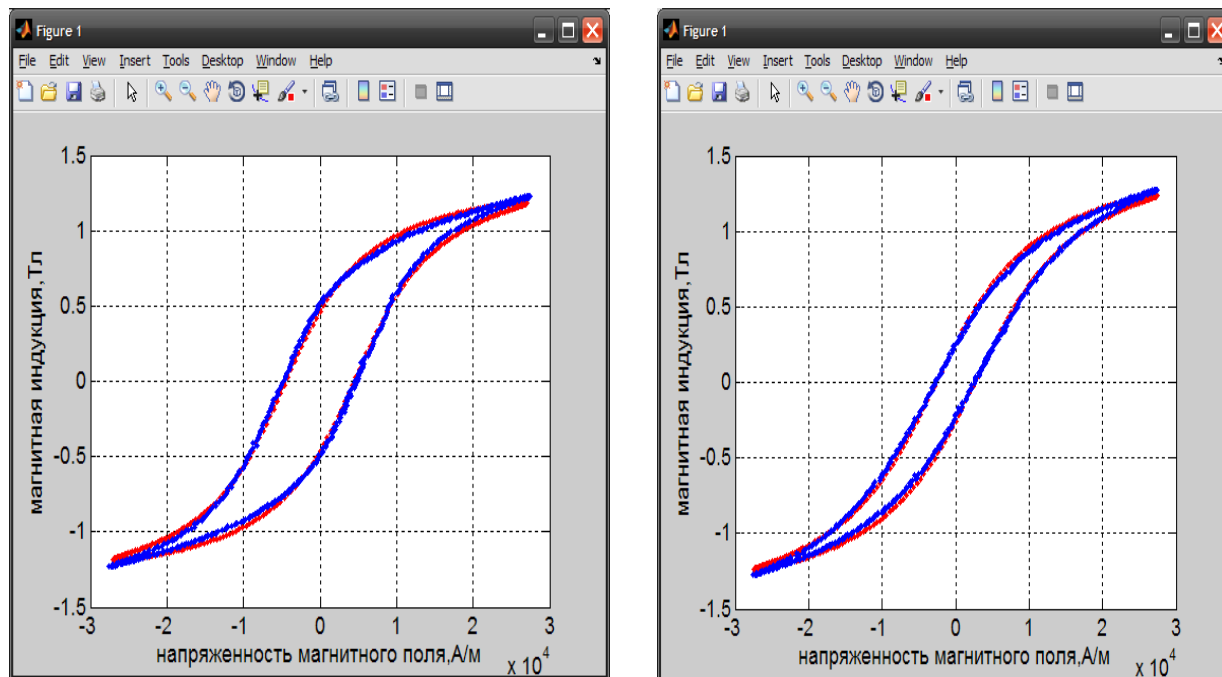
Полученные ранее результаты петель гистерезиса в виде файла информации загружались в цифровом формате в систему программирования MATLAB. В процессе эксперимента интегрирование сигнала ЭДС измерительной катушки производилось численным методом в виде математической модели Аркадьева, в которой использовались арктангенсовые функции с дальнейшим определением абсолютных значений магнитной индукции.

Например, для образца № 133 этот программный продукт имеет следующий вид:

```
t=0:1:360;
y=cos(2.*pi.*t./360);
fi=9.5;
b=3.3;
x=atan(b.*cos(2.*pi.*(t+fi)./360));
plot(y.*2.7.*10.^4,x.*0.93,'-r');
grid.
```

Полученные результаты эксперимента представлялись на одной картинке в виде абсолютного значения магнитной индукции для данного образца стали, которая была ранее определена экспериментально (рис. 3), и экспериментальной проверкой разработанной модели, показанные на рис. 5,а, где изображены экспериментальные точки (синяя линия) и теоретическая кривая, описанная с помощью модели (красная кривая). Можно отметить, что полученные экспериментальные и теоретические петли гистерезиса совпадают удовлетворительно с небольшой разницей.

Анализ результатов для образца стали № 245 (рис. 5,б) показывает точно такое расположение петель гистерезиса.



а)

б)

Рис. 5. Проверка применения математической модели для образцов стали: а - № 133 и б - № 245

В дальнейшем была рассмотрена возможность применения математической модели Ланжевена с применением программной среды программирования Matlab. В этой модели производятся математические действия с исходными данными и производится также, как и ранее, построение графиков теоретической и экспериментальной петли гистерезиса.

Листинг программы представлен в следующем виде:

```
t=0:1:360;% задание вектора аргумента t;
y=cos(2.*pi.*t./360);% формирование значений функции y;
fi=3;%поправочный коэффициент коэрцитивной силы;
y1=3.*cos(2.*pi.*t./360+fi.*pi./180);%формирование значений функции y1;
b=2.0;%поправочный коэффициент для магнитной индукции;
a=0:1:360;% задание вектора аргумента a;
x=coth(y1)-1./y1;%формирование значения аргумента x;
plot(y.*c.*10.^4,x.*d,'-r.') % построение графика теоретической петли гистерезиса;
grid % построение сетки на графике;
holdon % добавление нескольких графиков на одних осях;
U=[ 0 0.132587 -0.21337];;%данные, полученные при экспорте файла осциллографа;
Grid %построение сетки на графике;
t1=U(:,1);%выбор первого столбца данных (время);
a1=U(:,2).*23000';%поправка на смещение нуля осциллографа;
a2=-U(:,3)';%выбор третьего столбца данных ( ЭДС измерительной катушки);
s1=cumtrapz(t1,a2);%численное интегрирование методом трапеций с накоплением;
```

```
s2=s1-(max(s1)+min(s1))/2;% численное интегрирование методом трапеций с
накоплением;
set(gca,'FontSize',13);% установка и получение свойства графического объекта;
plot(a1,s2*100,'-b.');
```

plot(a1,s2\*100,'-b.');

```
% построение графика экспериментальной петли гистерезиса;
hold on % добавление нескольких графиков на одних осях;
ylabel('магнитная индукция,Тл');% подпись под осью y;
xlabel('напряженность магнитного поля,А/м');% подпись под осью x;
grid % построение сетки на графике.
```

В этой более сложной программе используются элементы:

- файл исходных данных, перенесенный из файла экспорта осциллографа;
- выборка информации о времени;
- ЭДС измерительного тока;
- ЭДС измерительной катушки;
- численное интегрирование;
- графическая обработка результата построения петли гистерезиса.

После проведенных, как и выше по заданной методике экспериментов, на экране осциллографа магнитного дефектоскопа фиксировались соответствующие абсолютные значения магнитной индукции для образца стали № 133, определенные экспериментально (рис. 3) и проверкой модели (рис. 6).

Сравнение результатов эксперимента производилось по распределению теоретической кривой и наличием рассчитанных экспериментальных точек.

Анализ полученных результатов показывает, что образец № 133 имеет характерную для магнитотвердых материалов площадь петли гистерезиса, при этом полученные результаты соответствовали следующим значениям: индукция насыщения 1,3 Тл, остаточная индукция 0,5 Тл, коэрцитивная сила 0,5 А/м.

Исходя из рис. 6, можно сделать вывод, что теоретическая и экспериментальная кривые удовлетворительно совпадают в диапазоне -0,2 Тл – 0,2 Тл магнитной индукции при параметрах:  $f_i=9,4$ ;  $b=1,5$ ;  $c=2,85$ ;  $d=2,76$ .

В остальных случаях в диапазонах -1 Тл – -0,2 Тл и 0,2 Тл – 1 Тл значение напряженности магнитного поля практическая отклоняется от теоретического на довольно не интересующую нас величину отклонения (погрешности) 75 %.

Такие исследования были проведены и для получения результатов, соответствующих абсолютному значению магнитной индукции для образца стали № 245, которые были определены экспериментально (рис. 4) и при проверки модели на результате измерения петли гистерезиса (рис. 7).

Следует отметить, что образец № 245 имеет характерную для магнитомягких материалов площадь петли гистерезиса, при этом после расчетов индукция насыщения составила 1,3 Тл, остаточная индукция 0,3 Тл, коэрцитивная сила 0,1 А/м.

Как и в предыдущем случае анализ полученных результатов исследования показывают, что теоретическая (синяя кривая) и экспериментальная (красная кривая) характеристики удовлетворительно совпадают в диапазоне -0,2 Тл – 0,2 Тл магнитной индукции при параметрах:  $f_i=5,6$ ;  $b=2$ ;  $c=2,78$ ;  $d=2,3$ .

В диапазонах -1 Тл – -0,2 Тл и 0,2 Тл - 1 Тл значение напряженности магнитного поля практическая отклоняется от теоретического, при этом величина отклонения (погрешности) может достигать до 20 %.

### **Заключение**

В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать заключение, что разработанная и проверенная на конструкционных стальных образцах экспериментальная установка в виде программы обработки результатов измерений в системе программирования Matlab, которая является составной частью известного магнитного дефектоскопа, позволила повысить точность измерения петли гистерезиса.

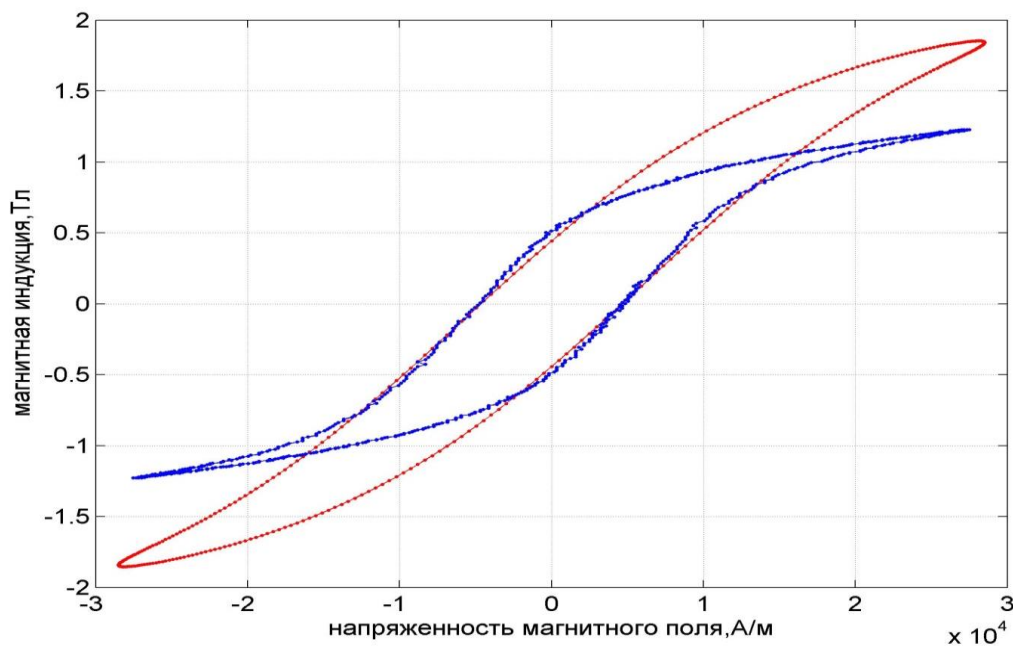


Рис. 6. Проверка применения модели на результате измерения петли гистерезиса образца № 133

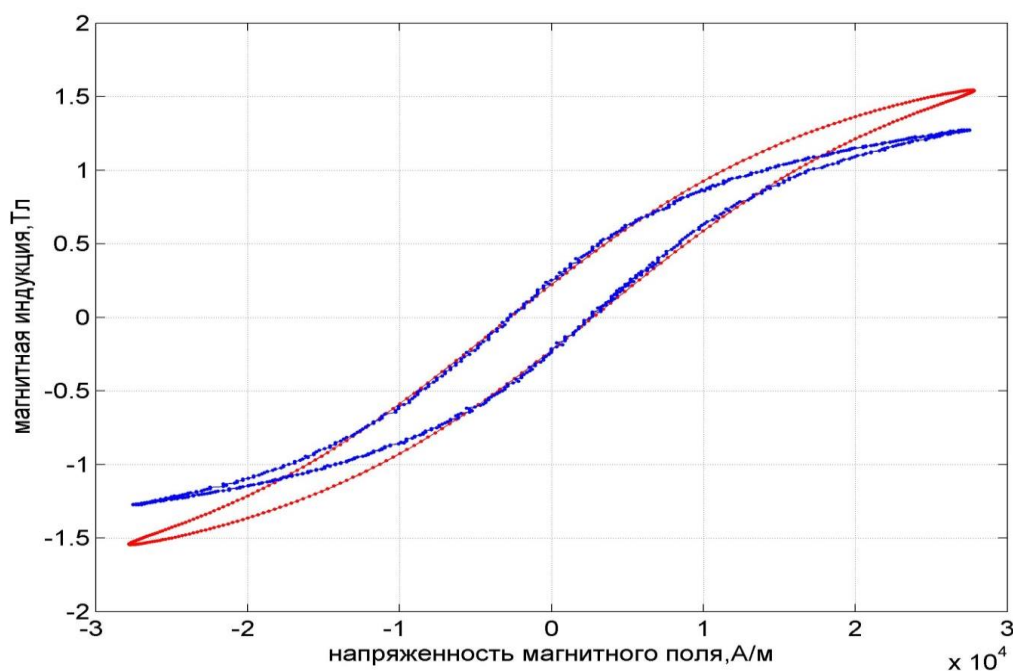


Рис. 7. Проверка применения модели на результате измерения петли гистерезиса образца № 245

В процессе эксперимента из двух рассмотренных математических моделей для получения подобных контролируемых параметров петли гистерезиса была определена лучшая из них – это математическая модель Аркадьева с использованием арктангенсовых функций с определением абсолютных значений магнитной индукции. При использовании данной модели погрешность при расчетах соответствовала минимальной величине и составила менее 5%. А вот применение модели Ланжевена соответствует погрешности более 5 % и даже при определенных условиях могут достигать до 75%. Конечно, из двух разработанных моделей было выявлено, что лучшей является модель Аркадьева.



Практическое применение модели Аркадьева позволяет помимо существенной экономии энергетических ресурсов и времени на обработку результатов экспериментов, проводить разработку и упрощение технологических процессов на объектах.

Предполагается дальнейшее развитие теории с целью более точного определения ошибок, связанных с параметрами системы намагничивания и с рассеянием магнитного поля, а также набор статических данных для образцов конструкционных сталей различных марок.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Сафарбаков А.М. Основы технической диагностики деталей и оборудования: учебное пособие / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов. – Ч. 1 – Иркутск: ИрГУПС, 2007. – 128 с.

2. Сафарбаков А.М. Основы технической диагностики деталей и оборудования: учебное пособие / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов. – Ч. 2 – Иркутск: ИрГУПС, 2007. – 110 с.

3. Программы поиска места отказа в объектах и системах железнодорожного транспорта: учебно-метод. пособие / С.В. Пахомов, А.М. Сафарбаков, Ю.С. Мухачев. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 88 с.

4. Ергучев Л.А. Магнитные методы и средства неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава: учебное пособие /Л.А.Ергучев. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 90 с.

5. Канавский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб.пособие/ И.Н. Канавский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: ДВГТУ, 2007. – 243 с.

6. Аверина К. А., Пахомов С. В. Лабораторный стенд для измерения магнитных свойств конструкционных сталей // Наука и молодежь: Сборник трудов четвертой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: ИрГУПС, 2018. – с. 67-71.

7. Ильин С.И. Технология термической обработки сталей: учебное пособие /Ильин С.И., Корягин Ю.Д. – Челябинск: Издательский центр Юур, 2009. – 120 с.

### **REFERENCES**

1. Safarbakov M. A. basics of technical diagnostics of parts and equipment: textbook / A. M. Safarbakov, A. V. Lukyanov, and S. V. Pakhomov. – Part 1 – Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2007. – 128 p.

2. Safarbakov M. A. basics of technical diagnostics of parts and equipment: textbook / A. M. Safarbakov, A. V. Lukyanov, and S. V. Pakhomov. – Part 2 – Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2007. – 128 p.

3. Programs of search of a place of refusal in objects and systems of railway transport: educational method. manual / S. V. Pakhomov, A. M. Safarbakov, Y. S. Mukhachev. – Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2013. – 88 p.

4. Ergashev, L. A. Magnetic methods and means of nondestructive testing of parts of railway rolling stock: textbook / L. A. Ergashev. – Gornel: Belgut, 2005. – 90 p.

5. Kanevsky I. N. Non-destructive methods of control: studies.manual/ I. N. Kanevsky, E. N. Salnikova. - Vladivostok: DVG TU, 2007. – 243 p.

6. Averina K. A., Pakhomov S. V. Laboratory stand for measuring the magnetic properties of structural steels / / Science and youth: proceedings of the fourth all-Russian scientific-practical conference of students, postgraduates and young scientists. – Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications, 2018. – p. 67-71.

7. Ilyin S. I. Technology of heat treatment of steels: textbook /Ilyin S. I., Koryagin Yu. D. - Chelyabinsk: publishing center yuur, 2009. – 120 p.

### **Информация об авторах**

*Аверина Ксения Андреевна* - магистрант, кафедра «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: ksune4ka.averina@mail.ru

*Пахомов Сергей Васильевич* - к. т. н., доцент, и.о. заведующего кафедрой «Физика, механика и приборостроение», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pahomov\_sv@irgups.ru

### **Authors**

*Averina Ksenia Andreevna* – master's degree student, Department «Physics, mechanics and instrument engineering», Irkutsk state University of railway engineering, Irkutsk, e-mail: ksune4ka.averina@mail.ru

*Pakhomov Sergey Vasilyevich* – Ph. D. in Engineering Science, associate Professor, acting head of the Department «Physics, mechanics and instrumentation», Irkutsk state University of Railways, Irkutsk, e-mail: pahomov\_sv@irgups.ru

### **Для цитирования**

Аверина К. А., Пахомов С. В. Определение магнитных характеристик ферромагнитных материалов по результатам петли гистерезиса [Электронный ресурс] / К. А. Аверина, С. В. Пахомов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2019. — №1(3). — Режим доступа: [http://mnv.irgups.ru/toma/1\(3\)-2019](http://mnv.irgups.ru/toma/1(3)-2019), свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 15.04.2019)

### **For citation**

Averina K. A., Pakhomov S. V. Determination of magnetic characteristics of ferromagnetic materials according to the results of the hysteresis loop [Electronic resource] / K.A. Averina, S. V. Pakhomov // Young science of Siberia: electron. science. journal. - 2019. - №1(3). - Access mode: [http://mnv.irgups.ru/toma/1\(3\)-2019](http://mnv.irgups.ru/toma/1(3)-2019), free. The title. from the screen. — Lang. Rusyi. English. (date of application: 15.04.2019) [Accessed 15/04/19]