

УДК 620.179.14

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ

**В.В. Филинов<sup>@</sup>**, д.т.н., профессор

**П.Г. Аракелов**, к.т.н.

**Е.В. Третьак**, студент

**Д.А. Головченко**, студент

*Московский технологический университет (МГУПИ), Москва, Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: [filinov@mirea.ru](mailto:filinov@mirea.ru)*

Приведены результаты разработки информационно-измерительной системы для регистрации магнитных параметров ферромагнитных сталей: характеристик петли гистерезиса и параметров магнитных шумов от сигналов скачков Баркгаузена. Приведены блок-схема прибора магнитошумового контроля и принцип его работы с использованием современной микропроцессорной техники и трехкоординатного сканера. Показаны возможности системы при контроле физико-механических свойств сталей, например, плосконапряженного состояния.

**Ключевые слова:** магнитные шумы, эффект Баркгаузена, коэрцитивная сила, магнитострикция, информационно-измерительная система.

## UNIVERSAL INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR THE STUDY OF MAGNETIC PROPERTIES OF FERROMAGNETIC STEELS

**V.V. Filinov<sup>@</sup>**

**P.G. Arakelov**

**E.V. Tretyak**

**D.A. Golovchenko**

*Moscow Technological University (MGUPI), Moscow, Russia*

*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: [filinov@mirea.ru](mailto:filinov@mirea.ru)*

The article deals with information-measuring system of magnetic noise control stress with the use 3D scanner and advanced microprocessor technology. A block diagram of the device magnetic noise control from signals of Barkhausen jumps and how it works. The possibilities of the system under the control of physical and mechanical properties of steels, for example, measurement plane stress.

**Keywords:** magnetic noise, Barkgauzene effect, coercive force, magnetostriction, information-measuring system.

Магнитные свойства сталей исследуются для разработки эффективных методов контроля и диагностики их физико-механических характеристик, во многом определяющих надежность, сроки эксплуатации и остаточный ресурс работы ответственных узлов, деталей, изделий в различных отраслях промышленности.

В [1] показано успешное использование параметров петли гистерезиса для контроля физико-механических свойств ферромагнитных сталей, например, таких параметров, как коэрцитивная сила ( $H_c$ ), остаточная индукция ( $B_r$ ), индукция насыщения ( $B_s$ ), магнитная проницаемость ( $\mu$ ), а также площадь петли ( $P$ ). Применение этих параметров позволяет исследовать глубинные слои деталей из ферромагнитных сталей, что актуально, например, при закалке габаритных изделий, в частности, рельсов или валов для турбин электростанций, где применение традиционных разрушающих методов контроля либо связано с большими трудозатратами, либо является дорогостоящим.

Важно отметить, что физические свойства металла на поверхности изделия не всегда совпадают со свойствами в глубине. Такое явление наблюдается при упрочнении поверхностных слоев путем их деформирования, поверхностной закалки или цементации, когда основным параметром является глубина обработанного слоя. При этом глубинные слои остаются без изменений.

Одновременное исследование поверхностного слоя и глубинных слоев может дать более полное представление о физических свойствах металла. Оно возможно при условии одновременного применения двух методов неразрушающего контроля:

- магнитные шумы (МШ) и магнитоакустические шумы (МАШ) перемагничивания [2];
- исследование параметров петли гистерезиса [1].

Энергетические и эмиссионные характеристики МШ и МАШ определяются перестройкой магнитной текстуры ферромагнетика скачками Бракгаузена, соответственно,  $180^\circ$  и  $90^\circ$  доменных границ, при его циклическом перемагничивании линейно изменяющимся магнитным полем. Поэтому МШ и МАШ несут разную информацию о физико-механических свойствах сталей, а параметры их сигналов во взаимосвязи могут использоваться для построения новых алгоритмов контроля и диагностики, например, напряженного состояния ответственных изделий из ферромагнитных сталей [2–4].

Цель настоящей работы – выявление магнитных свойств ферромагнитных сталей путем одновременного исследования поверхностных и глубинных слоев.

Для исследования глубинных слоев металла применяется режим низкочастотного намагничивания изделия и регистрация параметров петли гистерезиса при перемагничивании [1]. Низкие частоты обеспечивают проникновение электромагнитного поля на большую глубину и, соответственно, регистрацию параметров с глубинных слоев.

Для достижения поставленной цели нами разработана универсальная информационно-измерительная система МШ-3, которая представляет собой модульный прибор (рис. 1) [5, 6].

На материнской плате прибора для каждого из двух блоков обработки сигнала установлены усилители мощности ОРА541, позволяющие получать ток в обмотке электромагнитного преобразователя с разным режимом перемагничивания контролируемого изделия. Их охлаждение обеспечивают боковые алюминиевые радиаторы. Амплитуда и форма усиленного возбуждающего сигнала измеряются на резисторе, и подготовленный сигнал выводится на заднюю панель прибора и в измерительные блоки для регистрации параметров петли гистерезиса.

а



б

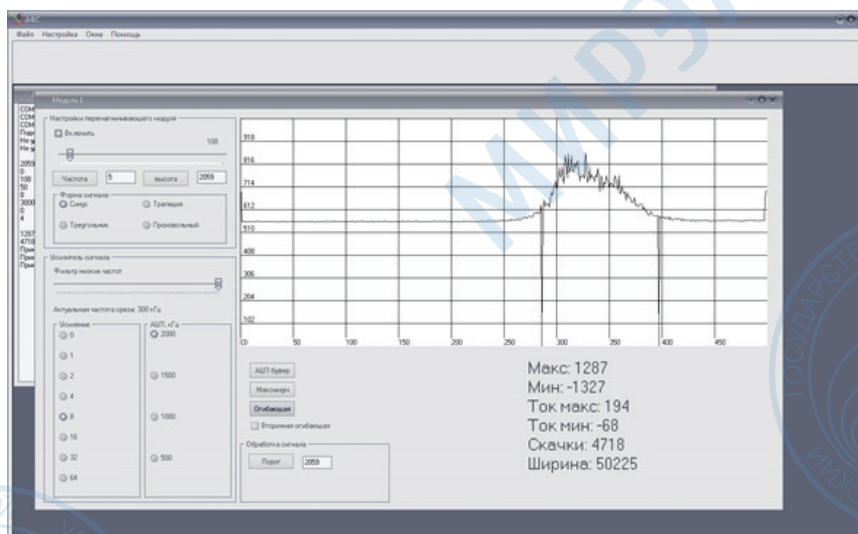


Рис. 1. Общий вид прибора МШ-3 (а) и главное окно программы для ПК (б).

Блок обработки сигнала МШ и МАШ (рис. 2) включает в себя:

- управляемый фильтр 10-го порядка;
- управляемый усилитель с программируемым коэффициентом усиления;
- цифровой сигнальный процессор  $\text{pic32MZ2048ECH100}$  с встроенным АЦП для обработки сигналов МШ, МАШ и получения параметров петли гистерезиса;
- блок питания для преобразования подаваемого с материнской платы постоянного напряжения состоит из отдельных модулей для цифровой и аналоговой части.

Блок цифровой обработки сигналов представляет собой печатную плату-модуль, подключаемую к материнской плате (рис. 3). Данный блок для повышения помехозащищенности спроектирован компактно, оснащен собственными стабилизаторами питания для уменьшения влияния помех по питанию, создаваемыми другими электронными компонентами, и закрывается металлическим экраном с заземлением. При запуске МШ-3 сигнальный процессор производит первичную инициализацию:

- настраивает тактовую частоту и таймеры;
- производит первичную инициализацию переменных;
- настраивает АЦП для измерения силы тока перемагничивающего сигнала и для приема измеренного сигнала;
- настраивает ЦАП для генерации перемагничивающего сигнала;
- настраивает интерфейсы UART и I2C для общения с интерфейсным модулем и

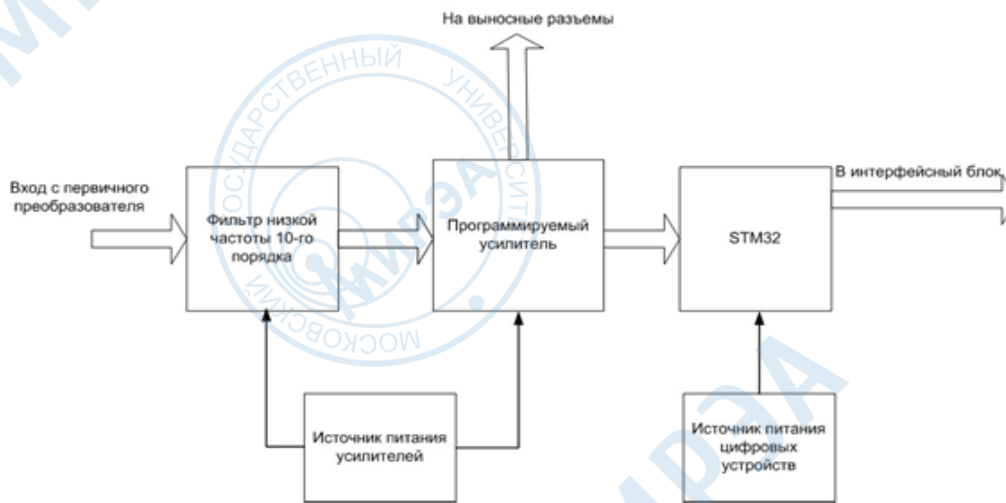


Рис. 2. Структурная схема блока обработки сигнала.

материнской платой;

- генерирует таблицу с одним периодом перемещающегося сигнала (синус, треугольник, трапеция или заданная пользователем форма) и передает ее в модуль ЦАП;
- настраивает векторы прерываний от модуля прямого доступа к памяти и периферийных интерфейсов;
- задает коэффициент усиления для программируемых каскадов усиления для полезного сигнала и для сигналов тока и напряжения перемещающегося сигнала.

Интерфейсный блок (рис. 4) предназначен для создания обмена информацией между пользователем и блоками обработки сигнала. С этой целью он снабжен цветным сенсорным TFT экраном с разрешением 480×272 пикселей, четырьмя кнопками и энкодером. Интерфейсный блок позволяет управлять настройками блоков обработки сигнала: частотой, амплитудой, формой перемещающегося сигнала, настройками, управляемыми усилителем и фильтром, АЦП и управлением мощными источниками питания для перемещающегося сигнала. Информация о сигналах МШ представляется в виде графика огибающей МШ и МАШ (рис. 1б), в виде формы петли гистерезиса и ее параметров:  $H_c$ ,  $B_r$ ,  $B_s$ ,  $\mu$ ,  $P$ , а также символьным представлением характеристик сигнала, в виде столбчатой диаграммы. Обмен данными с блоками обработки сигнала МШ и параметрами петли гистерезиса производится по интерфейсу UART. Получение служебной информации с материнской платы осуществляется по интерфейсу I2C. Заданные пользователем настройки сохраняются во внешней энергонезависимой памяти.

Для передачи информации между интерфейсным блоком и блоками обработки информации используется, как указывалось выше, интерфейс UART. Все блоки также объединены в общую систему обмена информацией на основе интерфейса I2C, что позволяет гибко подходить к проектированию программного обеспечения для комплекса из составных блоков.

Система МШ-3 позволяет регистрировать параметры петли гистерезиса  $B_r$ ,  $B_s$ ,  $H_c$ ,  $\mu$  и  $P$ , а также параметры сигналов МШ:

- минимум и максимум сигналов МШ и МАШ –  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$ ;
- регистрируемый ток перемещающегося сигнала –  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$ ;

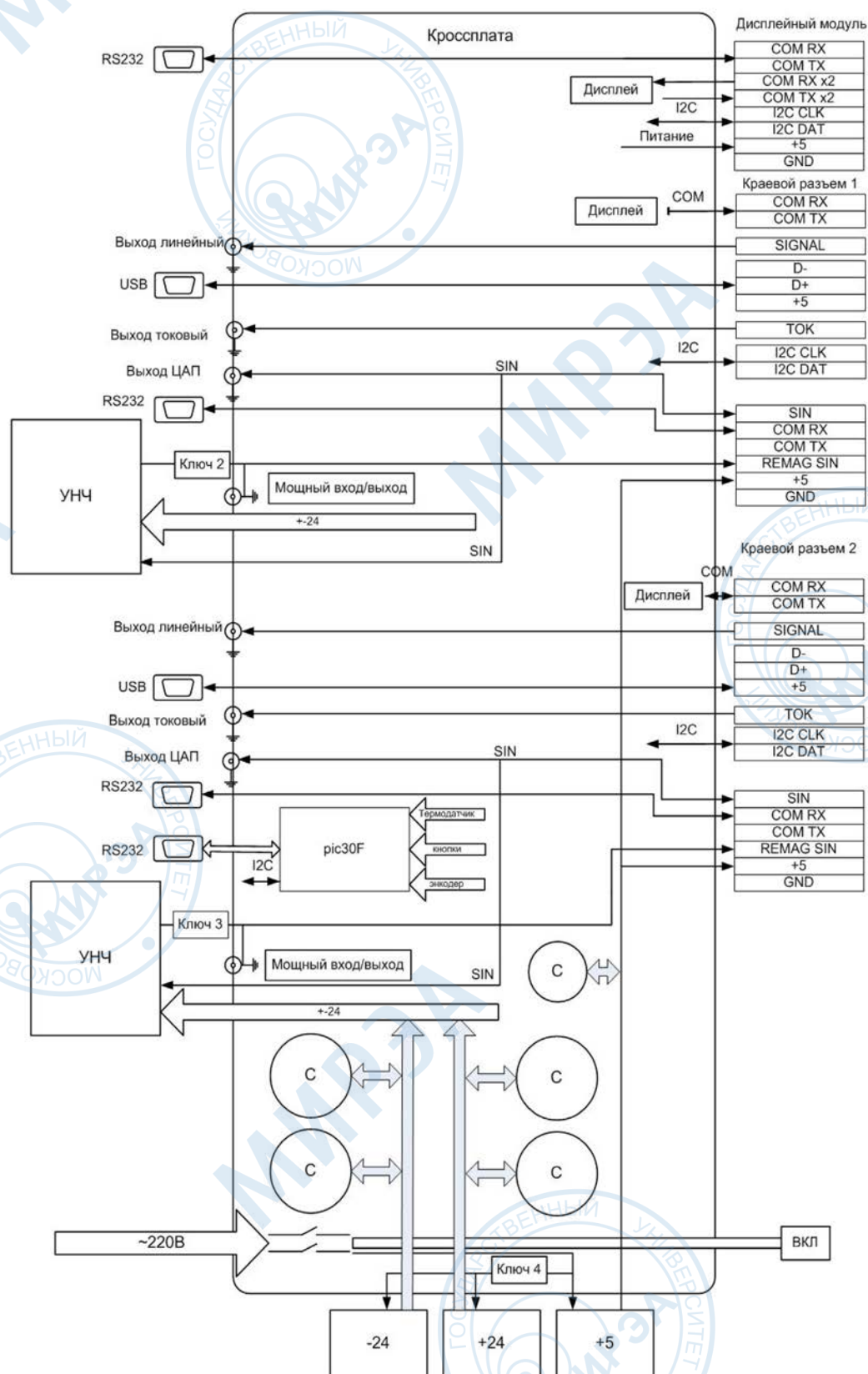


Рис. 3. Структурная схема материнской платы.



Рис. 4. Структурная схема интерфейсного блока.

- ширину сигнала –  $W$ ;
- начало сигнала –  $S$ ;
- количество скачков сигнала по всей ширине сигнала –  $N$ ;
- частотный анализ полученных параметров;
- проведение цифрового синхронного детектирования и других операций при обработке параметров сигналов петли гистерезиса.

Обработанный сигнал накапливается и по запросу пользователя передается на ПК или на интерфейсный блок.

Для работы с ПК написана программа, обеспечивающая захват и отображение регистрируемой измерительным блоком информации, в том числе, необработанных данных с АЦП для последующего сохранения и обработки в таких программах, как, например, MatLab 2009.

Разработка прибора и его испытания проведены на базе НУЦ «КАСКАД» МГУПИ. Испытания показали, что разработанная система успешно выполняет поставленные задачи и обладает высокой помехозащищенностью и возможностью ускоренной модернизации.

Таким образом, универсальная информационно-измерительная система МШ-3 является универсальным комплексом для отладки новых методик контроля и информативных параметров, на базе которой создаются малогабаритные приборы целевого назначения.

Для расширения возможностей прибора МШ-3 разработана система сканирования «СтрессСкан», обеспечивающая высокую точность и гибкость настройки процесса сканирования поверхности изделия [5, 6]. Его применение в тандеме с прибором магнитошумового контроля МШ-1 позволило создать карты цветности с нанесенными на них распределенными плоскостными напряжениями в изделиях из ферромагнитных сталей, в том числе, и в изделиях цилиндрической формы.

Фотографии трехкоординатного сканера представлены на рис. 5. Он оснащен сервоприводами с шаговыми моторами, управляется с ПК, сигналы от которого дешифровы-

ваются в блоке управления сканера микропроцессором фирмы ATMEL и усиливаются микросхемами драйверов шаговых двигателей, которые подают управляющие сигналы на обмотки шаговых двигателей. Сканер обладает следующими характеристиками:

- интерфейс связи с ПК: LPT;
- шаговые двигатели SM-200 без осевого люфта;
- программное подавление люфта ходовых винтов;
- скорость перемещения каретки – до 5 мм/с;
- шаг сканирования: от 0.0025 мм;
- рабочий объем: 220×220×220 мм.

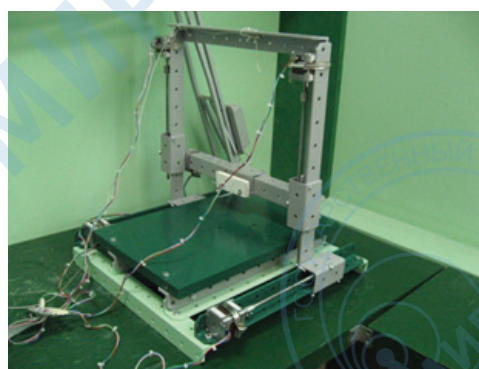
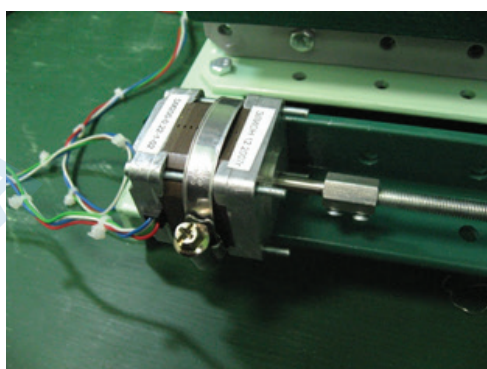
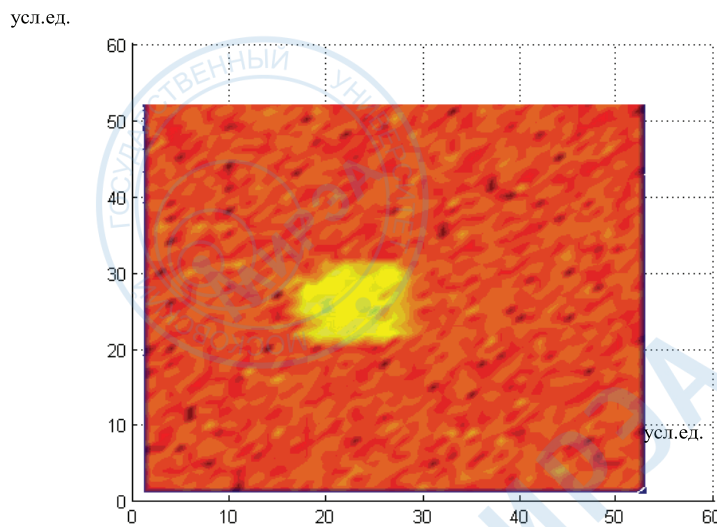


Рис. 5. Общий вид трехкоординатного сканера.

Согласно заданной пользователем программе движения, каретка сканера с первичным преобразователем перемещается в декартовой системе координат по поверхности контролируемого изделия, благодаря чему в заданных пользователем координатах обеспечивается контроль плосконапряженного состояния изделия с последующей передачей обработанных результатов на ПК. Собранные и обработанные данные сохраняются на твердом носителе. По окончании контроля выбранной области создается карта с указанием областей повышенной напряженности.

Шаг сканирования, скорость перемещения каретки и алгоритмы снижения погрешностей (люфта) движущихся элементов сканера задаются пользователем через прикладное программное обеспечение с ПК, что позволяет производить гибкую настройку работы сканера с учетом габаритов датчика и области перемагничивания, а также задавать алгоритмы обработки полезного сигнала, его фильтрации и способов визуального отображения.

Прибор МШ-3 и сканер-приставка обеспечили возможность сканировать, например, поверхность трубопровода с заданным шагом и одновременно менять направление перемагничивания относительно осей главных механических напряжений. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты контроля напряжений с использованием параметра  $U_m$  (напряжение МШ) после локальной пластической деформации поверхности образца в виде цветной графической карты на дисплее. Светлым отмечены сильно деформированные зоны, красным – зоны с меньшими деформациями.



**Рис. 6.** Результаты сканирования плоского образца с помощью сканера-приставки прибора МШ-1.

Таким образом, информационно-измерительная система МШ-3 позволяет регистрировать и исследовать практически все магнитные параметры поверхностных и глубинных слоев изделий из ферромагнитных материалов, выбирать из них наиболее коррелированные с контролируемыми свойствами изделий, разрабатывать новые методики и информативные параметры контроля, на базе которых возможно создать портативные приборы целевого использования.

#### Литература:

1. Ключев В.В., Мужичкий В.Ф., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Неразрушающий контроль. Т. 6. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2004. 376 с.
2. Филинов В.В. Методы и приборы контроля механических напряжений на основе использования магнитоакустических шумов. М.: Машиностроение, 2000. 154 с.
3. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Аракелов П.Г. Контроль технологических напряжений методом магнитных шумов // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 58–71.
4. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Исследование физико-механических свойств высокопрочной стали и возможности их контроля по параметрам магнитных и акустических шумов // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 47–51.
5. Филинов В.В., Шатерников В.Е., Филинова А.В. Разработка приборов для контроля механических напряжений, использующих магнитные шумы // Приборы. 2011. № 10. С. 5–10.
6. Филинов В.В., Аракелов П.Г. Разработка информационно-измерительной системы для контроля физико-математических свойств изделий из ферромагнитных сталей с использованием информативных параметров сигналов магнитных и магнитоакустических шумов // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 35–42.