

Р. М. Печерская, А. В. Чижов

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Повышение качества изделий, имеющих в своем составе электротехнические стали и прецизионные магнитомягкие сплавы, опирается на экспресс-анализ их магнитных свойств в процессе производства. Оперативно и с достаточной точностью это можно проводить на измерительно-вычислительных комплексах (ИВК). Целью данной работы является разработка такого ИВК для исследования параметров петель гистерезиса и основной кривой намагничивания магнитомягких материалов и параметров магнитопроводов в постоянных магнитных полях на базе индукционно-импульсного метода с коммутационным режимом изменения напряженности намагничивающего поля. Разработана структурная схема ИВК, обоснованы требования для компонентов блока намагничивания, предложен подход к определению числа диапазонов блока намагничивания и канала интегратора, позволяющих обеспечить заданную точность и погрешность измерения статических магнитных характеристик. Предложены способы минимизации и учета дрейфа интегратора.

Материалы и методы. Разработка ИВК основана на анализе индукционно-импульсного метода измерения статических магнитных характеристик в коммутационном и ступенчатом режимах изменения магнитного поля в замкнутой и разомкнутой магнитных цепях.

Результаты. Спроектирован и изготовлен опытный образец, представлены основные технические характеристики ИВК.

Выводы. ИВК позволяет определять коэрцитивную силу, магнитную проницаемость и магнитную индукцию по основной кривой намагничивания, предельной и частных петлях магнитного гистерезиса в замкнутой магнитной цепи с суммарной погрешностью не более $\pm 2,0$ % при сокращении времени измерения до 5 раз.

Ключевые слова: индукционно-импульсный метод, измерительно-вычислительный комплекс, магнитная проницаемость, магнитная индукция, коэрцитивная сила, петля гистерезиса, основная кривая намагничивания, магнитомягкие материалы.

R. M. Pecherskaya, A. V. Chizhov

COMPUTER MEASURING COMPLEXES FOR RESEARCH OF MAGNETIC MATERIALS' STATIC CHARACTERISTICS

Abstract.

Background. Quality improvement of the products, containing electrical steels or precision soft magnetic alloys in their composition, is based on the express-analysis of their magnetic properties in the production process. It can be carried out quickly and with sufficient accuracy by using computer measuring complexes (CMC). The purpose of this work is to develop such complex to study parameters of hysteresis loops and a basic magnetization curve of soft magnetic materials and magnetic circuit parameters in constant magnetic fields on the basis of the induction-pulse method with a switching mode variation of the magnetizing field. The block diagram of

the CMC was developed, requirements for magnetization block components were explained, the approach to the definition of a number of magnetization block ranges and integrator channels allowing to achieve the desired accuracy and precision of measurement of static magnetic characteristics was suggested. The authors proposed methods for minimization and registration of an integrator drift.

Results. A prototype was designed and built, the main technical characteristics of the CMC were shown.

Conclusions. CMC allow to determine the coercive force, magnetic permeability and magnetic induction using the main magnetization curve and the limited and special magnetic hysteresis loops in a closed magnetic circuit with the total error of less than $\pm 2,0\%$ and fivefold reduction in measurement time.

Key words: induction-pulse method, computer measuring complexes, magnetic permeability, magnetic induction, coercive force, hysteresis loop, main magnetization curve, soft magnetic materials.

При входном и межоперационном контролях в научных исследованиях часто необходимо выполнять прямые измерения и обработку их результатов [1]. Совершенствование средств и методик измерений статических магнитных характеристик позволяет получать материалы и изделия на их основе с управляемыми параметрами [2–4].

Наиболее подходящим для измерения магнитных характеристик в постоянных магнитных полях является индукционно-импульсный метод с коммутационным и ступенчатым режимами изменения напряженности магнитного поля, основное преимущество которого – статический режим с возможностью реализации на его основе различных методик измерения [5]. Это позволяет использовать индукционно-импульсный метод как для экспресс-анализа свойств материалов, так и в качестве прецизионных измерений. Метод оптимизирует время измерения за счет варьирования паузой между коммутациями тока намагничивания в диапазоне от 5 до 500 мс, поскольку поверхностный эффект и влияние вихревых токов сводятся к нулю, и числом точек измерения петли магнитного гистерезиса и основной кривой намагничивания, что сокращает время измерения до 5 раз. Метод применяется в ГОСТ 8.377–80, ГОСТ 12119–98, регламентирующих порядок действий при измерениях магнитных параметров магнитомягких материалов в постоянных магнитных полях.

С целью реализации в измерительно-вычислительном комплексе индукционно-импульсного метода измерения с коммутационным и ступенчатым режимами изменения напряженности магнитного поля рассмотрим требования к источнику тока намагничивания, интегратору и микроконтроллеру.

Требования к источнику намагничивания определены в соответствии с возможностями его построения в виде управляемого источника напряжения, либо в виде управляемого источника тока. Установлено, что предпочтительным является управляемый источник тока: напряженность намагничивающего поля определяется током обмотки намагничивания образца, соленоида или электромагнита и может задаваться с учетом коэффициента преобразования программируемого источника постоянного тока. В этом случае отсутствует влияние на заданное значение постоянного тока намагничивания сопротивления контактов, проводов цепи подключения и обмотки намагничивания, а также изменения их удельных сопротивлений вследствие нагрева при

пропускании больших токов. В источнике постоянного напряжения необходим контроль изменения тока намагничивания на выходе источника для обеспечения заданной напряженности постоянного поля, что в свою очередь может внести погрешность в измерения. Измерение установленного тока намагничивания осуществляется масштабирующим усилителем по падению напряжения на токоизмерительном резисторе R_I , включаемом последовательно с намагничивающей обмоткой I .

В качестве регулировочного устройства и интегрирующего преобразователя используется интегрирующий усилитель (ИУ) электродвижущей силы (ЭДС), который осуществляет измерение магнитного потока через измерительную обмотку W_2 в процессе перемагничивания. Напряжение на выходе ИУ пропорционально магнитному потоку с коэффициентом $1/\tau_{\text{int}}$, где $\tau_{\text{int}} = R_i C_i$ – постоянная времени интегратора, которая соответствует устанавливаемому диапазону ИУ.

Задание и коммутацию тока намагничивания возможно осуществить, управляя управляемым источником постоянного тока намагничивания (УИТ) микроконтроллером (МК) в соответствии с выбранным алгоритмом измерения.

При формировании основных технических требований к источнику тока намагничивания, интегратору цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера учтем основные магнитные свойства применяемых в промышленности магнитомягких материалов. Установлено [6], что для измерения максимальной магнитной проницаемости пермаллоев 79НМ и 80НХС в полях от 0 до $2H_c$ с методической погрешностью не более $\pm 1\%$ необходимо задавать в процессе измерения градиент изменения тока из диапазона от 0,0001 до 0,0005 А с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$. Диапазон тока обусловлен внутренним $D_{\text{вн}}$, наружным $D_{\text{н}}$ диаметрами тороидальных образцов-свидетелей и числом витков намагничивающей обмотки W_1 :

$$I = \frac{\pi H (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})}{2W_1}. \quad (1)$$

Это же утверждение относится и к другим магнитомягким материалам с наивысшей магнитной проницаемостью. Для интегрирования электродвижущей силы ЭДС вторичной обмотки U_{INTG} измерительный канал измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) должен обладать порогом чувствительности не хуже 10^{-10} В и погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$, поскольку индукция при измерении начальной магнитной проницаемости в диапазоне напряженности поля от 0 до 0,08 А/м может лежать в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $50 \cdot 10^{-4}$ Тл, что с учетом числа витков измерительной обмотки W_2 и площади поперечного сечения тороидальных образцов-свидетелей S составляет от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $25 \cdot 10^{-6}$ В:

$$B = \frac{U_{\text{INTG}} \tau}{2SW_2}, \quad (2)$$

Количество диапазонов источника тока намагничивания и микроверметра, позволяющее выполнять измерения магнитного потока при заданной напряженности поля с погрешностью не более $\pm 0,5\%$, определим, исходя из следующего:

1. Тороидальные образцы прецизионных магнитомягких сплавов и электротехнических сталей достигают индукции технического насыщения от 0,6 до 2,4 Тл в области напряженности поля более $(50 \dots 100)H_c$. Исходя из (1) и (2) установлено, что для создания такого поля однослойной многовитковой обмоткой намагничивания в тороидальном образце-свидетеле достаточным является ток 5 А, а для измерения магнитного потока однослойной многовитковой обмоткой – диапазон микроверметра 0,01 Вб.

2. Для измерения прямолинейных образцов длиной от 100 до 200 мм и диаметром или стороной квадрата 10 мм в соленоиде необходимо задавать поле H_s , превышающее поле H_m на величину $N \left(\frac{B_s}{\mu} - H_m \right)$, что для большинства существующих соленоидов достигается током 10 А, а измерение магнитного потока и поля осуществляется микроверметром в диапазоне 0,01 Вб.

3. Измерение начальной магнитной проницаемости тороидальных образцов пермаллоев осуществляется в области напряженности поля до 0,1 А/м. Из (1) и (2) установлено, что достижение таких полей осуществляется токами в диапазоне 0,005 А, а измерение потока – 0,00001 Вб.

4. Измерение максимальной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы тороидальных образцов осуществляется в полях до $2H_c$, которые создаются током намагничивания в диапазоне 0,5 А, а измерение магнитного потока – в диапазоне $5 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Определение числа диапазонов и разрядности ЦАП микроконтроллера n осуществляется, исходя из минимального тока I_{\min} , который необходимо установить с заданной инструментальной погрешностью δ в диапазоне I_R :

$$1 \leq \frac{2^{n-1}}{I_R} I_{\min} \delta \leq 3,3. \quad (3)$$

Аналогично определяется число требуемых диапазонов и разрядность АЦП.

Структурная схема ИВК представлена на рис. 1, внешний вид показан на рис. 2. Электронные узлы аппаратной части расположены в измерительном блоке (ИБ), подключаемом к ПК через интерфейс USB, включающий в себя следующие основные модули: блок питания, масштабирующий усилитель, УИТ, ИУ, МК. Образцы к ИВК подключаются на передней панели ИБ.

Основные технические характеристики «Измерителя параметров магнитомягких материалов»:

- Объектом контроля являются тороидальные образцы прецизионных магнитомягких сплавов и электротехнической стали с геометрическими размерами: внутренний диаметр от 8 до 50 мм, наружный диаметр от 10 до 54 мм, высота от 5 до 20 мм.

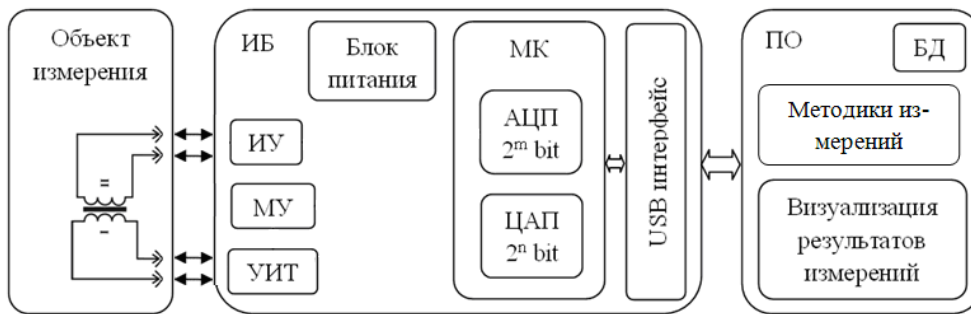


Рис. 1. Структура ИВК «Измеритель параметров магнитомягких материалов»

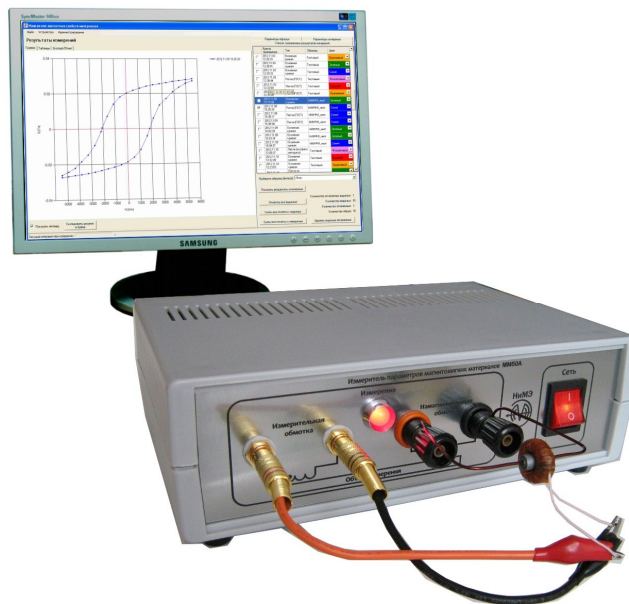


Рис. 2. Внешний вид ИВК «Измеритель параметров магнитомягких материалов»

- Измеряемые характеристики тороидальных образцов: петля магнитного гистерезиса $B(H)$, Тл, А/м; основная кривая намагничивания $B(H)$, Тл, А/м; остаточная индукция B_r , Тл; коэрцитивная сила по индукции H_{cB} , А/м; максимальная магнитная проницаемость μ_{max} ; магнитная проницаемость μ_e в заданном поле; начальная магнитная проницаемость μ_n ; индукция в заданном поле.

- Диапазоны изменения намагничивающего тока для тороидальных образцов: первый – от 0 до 0,5 А, второй – от 0 до 5,0 А, третий – от 0 до 50 А.

- Диапазоны измерения магнитного потока для тороидальных образцов: первый – от 0 до 5000 мкВб, второй – от 0 до 10000 мкВб.

- Диапазон измерения магнитной индукции: до 3 Тл.

- Диапазон измерения напряженности магнитного поля: до 16000 А/м.

- Приведенная погрешность установки намагничивающего тока δ_I не более $\pm 0,5\%$.

- Относительная погрешность измерения магнитного потока δ_Φ – не более $\pm 1,0\%$.

- Эксплуатационные характеристики:
 - напряжение питания, В, от сети, 220 ± 22 ;
 - потребляемая мощность при питании от сети, ВА, не более 1200;
 - габаритные размеры, мм, $260 \times 180 \times 90$;
 - масса, кг, не более 5.

Блок питания обеспечивает напряжения для всех узлов ИВК, в том числе и усилителя намагничивания УИТ. Для отслеживания работоспособности блока питания источник питания усилителя намагничивания вырабатывает цифровой сигнал, который подается в микроконтроллер.

УИТ, управление которым осуществляется по сигналу ЦАП МК, служит для перемагничивания исследуемых образцов и создания в них заданной напряженности поля в соответствии с выбранным алгоритмом измерения. Для управления УИТ и задания тока намагничивания используется 12-битный ЦАП МК. Установленный ток намагничивания дополнительно измеряется по падению напряжения на токоизмерительном резисторе R_I , включаемом последовательно с намагничивающей обмоткой I . Падение напряжения на резисторе R_U усиливается и подается на один из каналов АЦП контроллера.

Контроль перегрузки УИТ по напряжению осуществляется отдельным измерительным каналом АЦП МК, по которому передается код напряжения с выхода УИТ через резистивный делитель $R_1 R_2$. ИУ осуществляет измерение изменения магнитного потока через измерительную обмотку W_2 в процессе перемагничивания. Напряжение на выходе ИУ пропорционально изменению магнитного потока с коэффициентом $1/\tau_{\text{int}}$, где $\tau_{\text{int}} = R_i C_i$ – постоянная времени интегратора.

Для преобразования напряжения сигналов ИУ, канала измерения тока намагничивания и напряжения УИТ используются три канала 16-битного АЦП, дрейф которых после выполнения автокалибровок находится на уровне ± 3 единицы кода АЦП для каждого диапазона измерения (рис. 3).

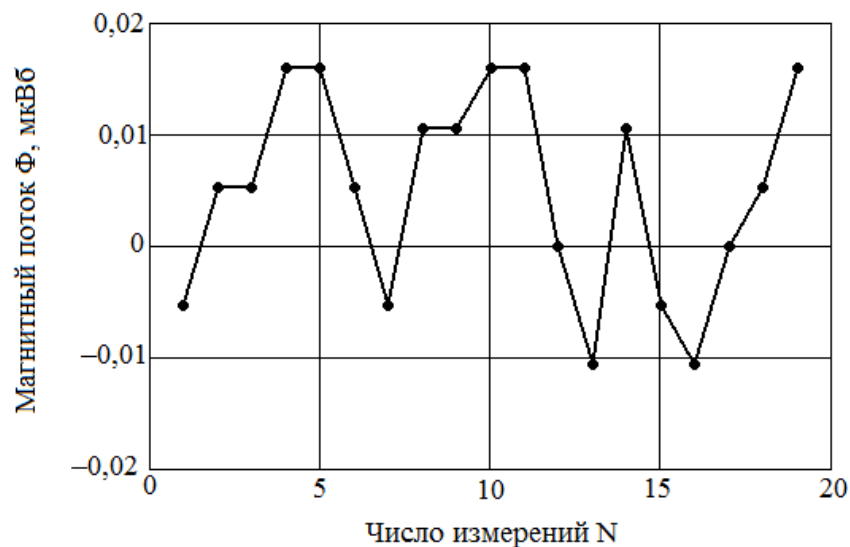


Рис. 3. Дрейф канала микроверметра на диапазоне 0,001 Вб после калибровки

МК осуществляет операции аналого-цифрового ввода/вывода измерительных сигналов и управление измерительными преобразователями системы в соответствии с поступающими командами алгоритмов измерения.

Оценка приведенной погрешности установки тока намагничивания и относительной погрешности измерения магнитного потока выполнены калибровкой измерительно-вычислительного комплекса по схеме (рис. 4). В качестве объекта измерения подключим катушку взаимной индуктивности Р536 (ГОСТ 20798–75) с взаимной индуктивностью $M = 0,001$ Гн и классом точности 0,2. Последовательно с катушкой взаимной индуктивности в цепь намагничивания подключим амперметр постоянного тока с диапазоном измерения от 0 до 5 А и собственной относительной погрешностью не более $\pm 0,1$ %.

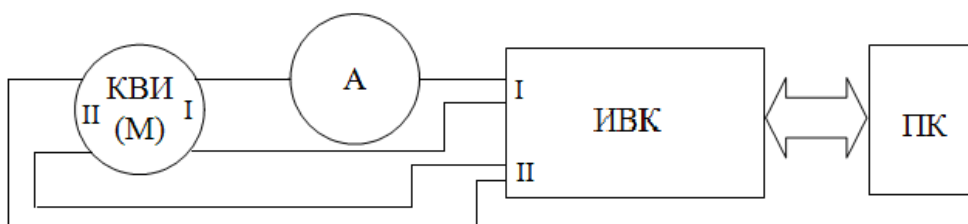


Рис. 4. К определению приведенной погрешности установки намагничивающего тока δ_I и относительной погрешности измерения магнитного потока δ_Φ

Вычисление средних арифметических значений тока намагничивания $\bar{I}_{\text{нам}}$ и магнитного потока $\bar{\Phi}$, оценка их среднего квадратического отклонения S , неисключенной систематической погрешности результата измерения Θ , приведенной погрешности установки тока δ_I и относительной погрешности измерения магнитного потока δ_Φ осуществляются в соответствии с ГОСТ 8.207–76. Результат калибровки показывает, что приведенная погрешность установки намагничивающего тока δ_I не превышает $\pm 0,5$ %, относительная погрешность измерения магнитного потока δ_Φ – не более $\pm 1,0$ %, а суммарная погрешность не превышает 2 %. В случае превышения последней корректируются постоянные интегратора τ_{int} , и процедура калибровки повторяется.

Выводы

1. ИВК позволяет измерять статические магнитные характеристики электротехнических сталей и прецизионных магнитомягких сплавов в коммутационном режиме изменения напряженности магнитного поля с суммарной погрешностью не более $\pm 2,0$ %.

2. Оптимизация ступенчатого и коммутационного режимов изменения напряженности магнитного поля в ИВК позволяет сократить время измерения основных магнитных параметров в постоянном магнитном поле до 5 раз.

3. ИВК позволяет корректировать инструментальную погрешность измерительных каналов за счет учета кода нулевого сигнала, что снижает вклад

дрейфа в измерения ЭДС вторичной обмотки до уровня $1,5 \cdot 10^{-5}$ В, канала измерения тока до уровня $4 \cdot 10^{-4}$ А, что в совокупности повышает достоверность результатов измерения.

Список литературы

1. **Кузьмин, Д. А.** Разработка информационно-измерительной системы мониторинга качества электрической энергии с возможностью управления значениями коэффициентов гармонических искажений по току и напряжению / Д. А. Кузьмин, В. Я. Горячев, Н. Б. Джазовский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 2 (18). – С. 104–112.
2. **Матюк, В. Ф.** Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов при квазистатическом перемагничивании / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 4. – С. 3–34.
3. Магнитоизмерительный комплекс для магнитоструктурных исследований / Э. С. Горкунов, В. Н. Махов, А. М. Поволоцкая, С. В. Тузанкин, Ю. С. Субботин, Б. М. Лapidус // Дефектоскопия. – 1999. – № 3. – С. 78–84.
4. **Дидик, Ю. И.** Установка для измерения магнитных свойств магнитомягких материалов в импульсном режиме перемагничивания / Ю. И. Дидик, Г. С. Корзунин, М. Ю. Дидик // Дефектоскопия. – 2001. – № 7. – С. 13–24.
5. **Преображенский, А. А.** Магнитные материалы и элементы : учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1986. – 352 с.
6. **Печерская, Р. М.** Методика определения максимальной магнитной проницаемости пермаллоев в постоянном магнитном поле / Р. М. Печерская, А. В. Чижов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 202–206.

References

1. Kuz'min D. A., Goryachev V. Ya., Dzhazovskiy N. B. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavede-niy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 2 (18), pp. 104–112.
2. Matyuk V. F., Osipov A. A. *Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics]. 2011, no. 4, pp. 3–34.
3. Gorkunov E. S., Makhov V. N., Povolotskaya A. M., Tuzankin S. V., Subbotin Yu. S., Lapidus B. M. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 1999, no. 3, pp. 78–84.
4. Didik Yu. I., Korzunin G. S., Didik M. Yu. *Defektoskopiya* [Defectoscopy]. 2001, no. 7, pp. 13–24.
5. Preobrazhenskii A. A., Bishard E. G. *Magnitnye materialy i elementy: uchebnik dlya stud. vuzov po spets. «Poluprovodniki i dielektriki»* [Magnetic materials and elements: textbook for university students majoring in “Semiconductors and dielectrics”]. Moscow: Vysshaya shkola, 1986, 352 p.
6. Pecherskaya R. M., Chizhov A. V. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical bulletin of Volga region]. 2014, no. 3, pp. 202–206.

Печерская Римма Михайловна

доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: micro@pnzgu.ru

Pecherskaya Rimma Mikhaylovna

Doctor of engineering sciences,
professor, sub-department of nano-
and microelectronics, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Чижов Андрей Вячеславович

руководитель группы
электротехнических и магнитных
испытаний и измерений, Центральная
заводская лаборатория (ЦЗЛ № 20),
Производственное объединение «Старт»
имени М. В. Проценко (Россия,
Пензенская область, г. Заречный,
пр. Мира, 1)

E-mail: lifting2@mail.ru

Chizhov Andrey Vyacheslavovich

Leader of the electrical and magnetic
measuring and testing team, Central
factory laboratory, Production association
“Start” named after M.V. Protsenko
(1 Mira avenue, Zarechny, Penza
region, Russia)

УДК 621.317.42

Печерская, Р. М.

Измерительно-вычислительный комплекс для исследования статических характеристик магнитомягких материалов / Р. М. Печерская, А. В. Чижов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2015. – № 1 (33). – С. 99–107.